

ICS 31.200
CCS L 56

团 体 标 准

T/CIE 192-2023

芯粒间互联通信协议

Chiplets Interconnect Protocol

CIP V1.0

(报批稿)

2023-10-26 发布

2024-1-1 实施

中国电子学会 发布

目 次

前 言.....	3
1 范围	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 缩略语.....	4
5 总体框架.....	4
5.1 基本概述.....	4
5.2 系统架构.....	5
5.3 信息交互模式.....	8
6 协议适配器与节点.....	11
6.1 基本概述.....	11
6.2 协议适配器网络相关层.....	11
6.3 协议适配器设备相关层.....	13
6.4 协议适配过程.....	17
7 事务	21
7.1 基本概述.....	21
7.2 读事务.....	22
7.3 写事务.....	24
7.4 中断事务.....	25
7.5 DMA 事务.....	26
7.6 共享事务.....	27
8 信息传送过程.....	28
8.1 基本概述.....	28
8.2 重传机制.....	28
8.3 从节点中断信息传送过程.....	29
8.4 主节点-从节点数据传送过程	32
8.5 主节点-主节点数据传送过程	32
8.6 主节点-对等节点数据传送过程	34
8.7 对等节点-对等节点数据传送过程	34
8.8 对等节点-从节点数据传送过程	34
8.9 从节点-从节点数据传送过程	34
参考文献.....	36
图 1 基于拓展互联芯粒的通信系统架构.....	5
图 2 CIB 标准总线.....	6
图 3 扩展端口适配器.....	7
图 4 CIB 总线数据包的收发通道	8
图 5 一般包格式.....	8
图 6 请求者网络相关层视角.....	12
图 7 响应者网络相关层视角.....	12
图 8“请求-响应”者网络相关侧视角.....	13
图 9 请求者接口.....	13
图 10 响应者接口.....	14
图 11 主节点设备相关层请求者接口	15
图 12 主节点设备相关层响应者接口.....	15
图 13 ATU 映射过程.....	16

图 14 从节点设备相关层请求者接口.....	16
图 15 从节点设备相关层响应者接口.....	17
图 16 主节点/对等节点请求者请求适配过程.....	17
图 17 主节点/对等节点请求者响应适配过程.....	18
图 18 从节点请求者请求适配过程.....	18
图 19 从节点请求者响应适配过程.....	19
图 20 从节点响应者接口数据适配过程.....	20
图 21 主节点响应者接口数据适配过程.....	20
图 22 从节点响应者请求数据适配过程.....	21
图 23 主节点/对等节点响应者请求数据适配过程.....	21
图 24 独立响应包格式.....	22
图 25 读事务流程.....	23
图 26 读事务乱序重排.....	23
图 27 读请求包格式.....	23
图 28 读响应包格式.....	24
图 29 写事务流程.....	24
图 30 两次独立的写事务.....	24
图 31 写请求包格式.....	25
图 32 中断事务流程.....	25
图 33 中断请求包格式.....	26
图 34 DMA 事务流程.....	26
图 35 DMA 请求包格式.....	27
图 36 共享事务流程.....	27
图 37 共享请求包格式.....	28
图 38 CIP 协议的重传机制.....	29
图 39 单扩展互联芯粒内的中断流程.....	30
图 40 多扩展互联芯粒间的中断流程.....	31
图 41 主节点-从节点数据传送过程.....	32
图 42 主节点-主节点数据传送流程.....	33
图 43 从节点-从节点数据传送过程.....	35
表 1 CIBD 总线信号定义.....	6
表 2 CIBP 总线信号定义.....	6
表 3 一般包格式编码.....	9
表 4 事务及其行为.....	10
表 5 独立响应编码.....	22
表 6 读请求编码.....	23
表 7 读响应编码.....	24
表 8 写请求编码.....	25
表 9 中断请求编码.....	26
表 10 DMA 请求编码.....	27
表 11 共享请求编码.....	28

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电子学会提出并归口。

本文件起草单位：中国电子科技集团公司第五十八研究所、电子科技大学、中国电子科技集团公司智能科技研究院、浙江大学、江苏微锐超算科技有限公司。

本文件主要起草人：魏敬和、黄乐天、汪志强、王小航、欧嵬、华松逸、王乐然、陈龙、高营、鞠虎、李杨、帅喆、胡小燕。

1 范围

本文件规定了芯粒间互联通信协议的总体架构、协议适配器与节点、事务、信息传送过程的协议技术要求。

本文件可指导使用现有协议及接口（如 PCIe、SRIO、DDR、AXI 等）的 CPU/GPU/FPGA/DSP/NPU/ASIP 等货架处理器件裸芯（die）、各类存储器裸芯以及未来设计含有 CIB 标准总线接口的裸芯搭建起来的多裸芯系统的设计、验证、封装、测试等。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

芯粒互联通信协议 Chiplet Interconnect Protocol

一套用于芯粒互联的协议簇，规定了芯粒互联系统中通信执行者之间的通信模式以及信息传送方式，兼容现有协议及接口（如 PCIe、SRIO、DDR、AXI 等）。简称 CIP。

3.2

芯粒互联总线 Chiplet Interconnect Bus

支撑芯粒互联通信协议的总线，用于基于 CIP 的互联系统中各模块间的互连。具体包含芯粒内部交换总线和芯粒间扩展总线两种总线，支持多芯粒扩展。简称 CIB。

3.3

芯粒内部互联总线 Chiplet Interconnect Bus on Die

支撑芯粒内部互联协议的总线。简称 CIBD。

3.4

芯粒间扩展互联总线 Chiplet Interconnect Bus on Package

支撑芯粒间扩展互联协议的总线，支持多芯粒扩展。简称 CIBP。

3.5

拓展互联芯粒 External Interconnection Chiplet

集成与现有协议及接口（如 PCIe、SRIO、DDR、AXI 等）互联的 CIP 协议适配器、配置单元、时钟管理、通信链路等电路模块，可支持多芯粒通信系统的互联。

3.6

互联织网 Interconnection Fabric

一个由外部设备与拓展互联芯粒组成，具有完整信息交互功能的通信系统，可实现与具有现有协议及接口（如 PCIe、SRIO、DDR、AXI 等）的外部设备间的通信。

3.7

主设备 Master Device

在通信过程中，获取协议总线控制权的设备。

3.8

从设备 Slave Device

在通信过程中，被主设备访问的设备。

3.9

对等设备 Peer Device

在通信过程中，既能获取总线控制权，又能被主设备或其他对等设备访问的设备。根据通信行为的不同，分为虚主设备、虚从设备，表征为主设备、从设备。

3.10

外部设备 External Device

与协议适配器形成节点的设备，属于主设备、从设备或对等设备其中一种。

3.11

互联接口 Interconnection Interface

互联织网上与外部设备直连的接口。

3.12

CIP 协议适配器 CIP Protocol Adapter

互联接口中负责现有协议及接口（如 PCIe、SRIO、DDR、AXI 等）与 CIP 协议相互转换的模块。若无特殊说明，本文件提到的协议适配器均指 CIP 协议适配器。

3.13

CIP 标准总线接口 CIP Standard Interface

按照 CIP 协议规定设计的标准总线接口，使用 CIP 协议直接与外部通信。若无特殊说明，本文件提到的标准总线接口指 CIP 标准总线接口。

3.14

CIP 地址映射单元 CIP Address Translation Unit

互联接口中负责地址映射服务的模块。若无特殊说明，本文件提到的地址映射单元均指 CIP 地址映射单元。

3.15

节点 Node

CIP 互联系统中通信行为的执行者。使用标准总线接口的设备自身为一个节点，使用现有协议及接口（如 PCIe、SRIO、DDR、AXI 等）的设备与互联接口连接形成的整体为一个节点。按照功能分为三种类型：主节点、从节点以及对等节点。其中主节点中的外部设备为主设备，从节点中的外部设备为从设备，对等节点中的外部设备为对等设备。对等设备在通信的过程中表征为虚主/虚从设备，其与互联接口形成的节点在通信过程中对应表征为虚主/虚从节点。

3.16

数据包 Data Packet

由操作信息和路由信息组成的一系列数据。通常有请求和响应两种类型。

3.17

写请求 Write Request

CIP 协议用于向目标节点写入数据的一种请求。

3.18

读请求 Read Request

CIP 协议用于从目标节点读取数据的一种请求。

3.19

共享写请求 Shared Write Request

CIP 协议用于发起共享事务的一种请求。

3.20

DMA 写请求 DMA Write Request

CIP 协议用于发起 DMA 事务的一种请求。

3.21

中断请求 Interrupt Request

CIP 协议用于向目标节点发起中断的一种请求。

3.22

独立响应 Standalone Respond

CIP 协议用于表征请求是否被正确执行的一种响应。

3.23

读响应 Read Respond

CIP 协议用于返回读请求指向的数据的一种响应。

3.24

内存语义 Memory Semantics

以读写、加载存储为基础构建的语义，简化主、从对等节点间数据搬移的操作逻辑，提升通信效率。

3.25

事件 Event

两个节点之间交换一次请求响应的行为。

3.26

事务 Transaction

两个或多个节点间交换一系列请求响应的行为，能够完成一定的操作。一个事务可能包含一个或多个事件。

3.27

互连 Interconnect

不同芯粒间的物理连接通路。

3.28

互联 Intercommunication

在互连的基础上，使用通信协议协调调度实现信息交互的方式。

3.29

包解析器 Packet Decoder

互联接口中提取数据包中有效信息的模块。

3.30

包生成器 Package Builder

互联接口中将有效信息打包为数据包的模块。

3.31

虚通道 Virtual channel

以时分复用的形式共享同一链路的若干通道，在逻辑上每个通道独立。

3.32

CIP 扩展端口适配器 CIP Expansion Port Adapter

互联织网间相互通信的接口模块。若无特殊说明，本文件提到的扩展端口适配器均指 CIP 扩展端口适配器。

4 缩略语

下表说明了文件内出现的英文缩写。

缩略语	英文全拼
CIP	Chiplet Interconnect Protocol
CIB	Chiplet Interconnect Bus
CIBD	Chiplet Interconnect Bus on Die
CIBP	Chiplet Interconnect Bus on Package
ATU	Adress Translation Unit
DMA	Direct Memory Access
PCIe	Peripheral Component Interconnect Express
AXI	Advanced eXtensible Interface
SRIO	Serialized RapidIO
DDR	Double Data Rate SDRAM

5 总体框架

5.1 基本概述

本文件聚焦多芯粒通信系统中链路层与协议层的信息传送，提出芯粒互联通信协议，并利用业界已有现有协议及接口（如 PCIe、SRIO、DDR、AXI 等），解决芯粒间的信息交互问题，不需要对既有接口做改动即可实现多芯粒的快速集成与相互协同，为采用国产货架裸芯构建多芯粒系统提供解决方案。

5.2 系统架构

5.2.1 总体结构说明

芯粒互联总线（CIB）架构是支撑芯粒互联通信协议（CIP）的具体实现形式，由节点、通信链路、扩展端口构成。节点包含外部设备（包括主设备、从设备、对等设备）以及其对应的协议适配接口，是互联系统中操作执行者。通信链路实现各个节点的互联，使用 CIP 协议在各个节点以及扩展端口间传递信息。扩展端口与通信链路连接，将通信链路内使用的 CIBD 总线与通信链路间传递信息的 CIBP 总线相互转换，实现在不同通信链路间传送信息。本文件不对节点间传递信息的通信链路做规定，只要保证数据包在传输过程中无误即可。

各节点连接在通信链路上，通过通信链路传递节点间的通信内容。节点间的通信采用内存语义的操作模式，节点内部的裸芯统一使用读/写、加载/存储的操作，完成与网络中其他节点的通信事务，包括读写、中断、DMA 等。

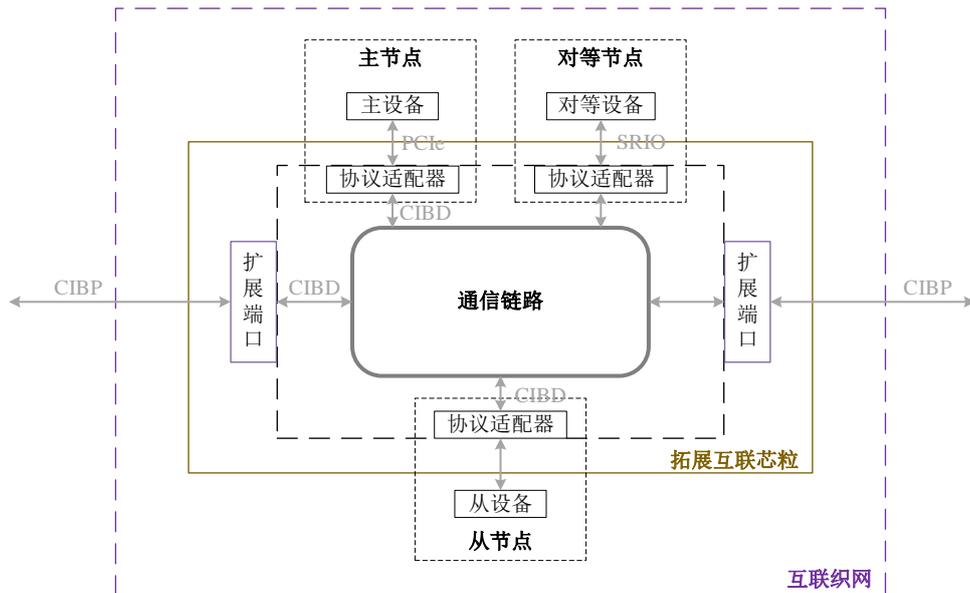


图 1 基于拓展互联芯粒的通信系统架构*

在 CIP 互联系统中，各个外部设备与协议适配接口连接形成节点，各节点通过互联网连接形成局部网络，局部网络通过扩展接口连接可形成更大规模的互联系统。图 1 展示了 CIP 协议下的互联网架构，其中可包括：

- 节点内部使用 PCIe 协议的主节点，此协议的版本根据用户需求确定；
- 节点内部使用 Rapid IO 协议的对等节点，此协议版本同样根据用户需求确定；
- 节点内部使用 DDR 操作协议的从节点；
- 使用 CIBD 总线传输信息的通信链路，是一个保证数据包正确传输的逻辑链路，可为任意拓扑形式；
- 将互联网内部 CIBD 总线转化为 CIBP 总线，以扩展为更大的互联系统的扩展端口。

注*：图中的主节点、对等节点、从节点的分类与节点内的外部设备协议无关，与外部设备在通信过程中的通信行为有关。本文件中主节点中的 PCIe、对等节点中的 Rapid IO 以及从节点中的 DDR 等仅作为示例。

5.2.2 标准总线接口

CIP 互联系统中，通信链路与节点、节点与节点以及互联网与互联网间均通过标准总线接口互联，如图 2 所示，通信链路内部、通信链路与节点以及通信链路与扩展端口间使用 CIBD 总线进行互联，扩展端口与扩展端口间使用 CIBP 总线进行互联。

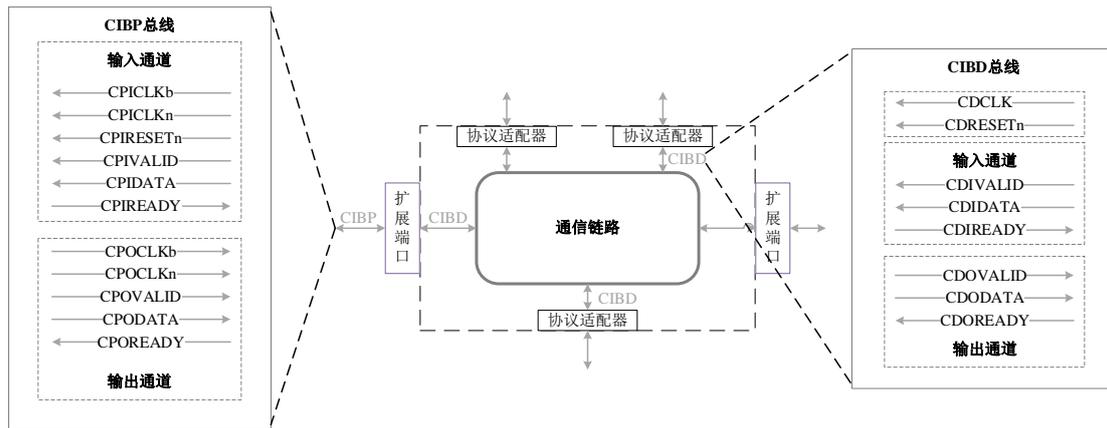


图 2 CIB 标准总线

芯粒内部互联总线 CIBD

CIBD 用于互联织网内部高速互连，共享全局同步时钟，其接口由输入输出两个通道构成，通道由握手信号 VALID、READY 以及最大支持 256b 位宽的可配置数据信号 DATA 构成。握手信号 VALID 表示输出通道的发送请求并且需要发送的数据已经载入 DATA 信号中，握手信号 READY 表示输入通道已经完成对 DATA 中的数据采样，一次信号传输完成。CIBD 具体信号定义如表 1 所示。

表 1 CIBD 总线信号定义

信号名	位宽	方向	说明
CDCLK	1bit	输入	全局时钟
CDIVALID	1bit	输入	输入通道数据有效
CDIDATA	nbit*	输入	输入通道数据
CDIREADY	1bit	输出	输入通道数据确认
CDOVALID	1bit	输出	输出通道数据有效
CDODATA	nbit*	输出	输出通道数据
CDOREADY	1bit	输入	输出通道数据确认

注*：n 可配置为 256、128、64、32。

芯粒间扩展互联总线 CIBP

CIBP 用于互联织网间经扩展端口的互联，CIBP 的直连通路由两个处于独立时钟域通道构成，每个通道具有独立的时钟、复位信号，以及 VALID、READY 握手信号和位宽可配置的 DATA 数据信号，并且所有信号都以差分形式成对出现。CIBP 具体信号定义如表 2 所示。

表 2 CIBP 总线信号定义

信号名	位宽	方向	说明
CPICLKb	1bit	输入	输入通道差分时钟
CPICLKn	1bit	输入	输入通道差分时钟
CPIRESETn	1bit	输入	复位
CPIVALID	1bit	输入	输入通道数据有效
CPIDATA	nbit	输入	输入通道数据
CPIREADY	1bit	输出	输入通道数据确认
CPOCLKb	1bit	输出	输出通道差分时钟
CPOCLKn	1bit	输出	输出通道差分时钟
CPOVALID	1bit	输出	输出通道数据有效
CPODATA	nbit	输出	输出通道数据
CPOREADY	1bit	输入	输出通道数据确认

5.2.3 协议适配器与节点

在 CIP 互联系统中，通信行为执行者是节点。使用标准总线接口的外部设备可作为节点与通信链路直连通信，而使用现有协议及接口（如 PCIe、SRIO、DDR、AXI 等）的外部设备需通过与协议适配器互联形成节点后与通信链路进行通信。

协议适配接口将外部设备使用的本地协议转化为 CIP 协议，屏蔽当前节点互连的外部设备自身的物理特性。根据实现的功能，协议适配器可分为两部分：设备相关侧与网络相关侧。设备相关侧实现与外部设备的通信，将外部设备的本地协议通信转变为节点内部通信。网络相关侧实现节点与互联织网中通信链路的通信。

根据外部设备与协议适配器的设备相关侧通信行为的不同，将节点分为主节点、从节点以及对等节点，对应主从协议中的主机、从机、对等机。根据协议适配器网络侧与通信链路通信行为的不同，将节点分为请求者、响应者，实现节点对请求和响应包不同处理方式。一个节点只能是主节点、从节点或对等节点其中的一种：

- **主节点**：在主-从协议中，身份为主机的外部设备，其协议适配器的设备相关侧包含主节点相关模块，该外部设备与协议适配器连接形成的节点为主节点。
- **从节点**：在主-从协议中，身份为从机的外部设备，其协议适配器的设备相关侧包含从节点相关模块，该外部设备与协议适配器连接形成的节点为从节点。
- **对等节点**：使用对等协议的外部设备，其协议适配器的设备相关侧包含对等节点相关模块，该外部设备与协议适配器连接形成的节点为对等节点。

协议适配器与节点详细介绍详见第六章：协议适配器与节点。

5.2.4 扩展端口适配器

扩展端口适配器由通道分配器、旁路控制器及扩展端口构成，负责数据包在互联织网间的路由以及传输。如图 3 所示。



图 3 扩展端口适配器

通道分配器

互联织网间的互联采用环网的拓扑结构，网络中数据流向使用通道分配器对数据通道进行仲裁及分配。通道分配器实现以下功能：

- 接收本地或另一互联织网的数据包；
- 将接收到的 CIBD 总线格式本地数据包转化为扩展的 CIBP 总线格式；
- 将本地接收的 CIBP 总线格式数据包转化为 CIBD 总线格式；
- 确认数据包目的地互联织网，并向本地或另一互联织网转发数据包；
- 仲裁旁路通路与本站数据包的传输通路，将旁路通路的优先级设为最高。

旁路控制器

旁路控制器用于控制旁路路上的数据流。旁路通路是一条连接于互联织网中的两个扩展端口控制器之间且不经过通信链路的直连物理通路，解决某些情况下数据传输需求。例如，一个从外部进入的数据包期望跨过当前互联织网传输，在不设置旁路通路的情况下，该数据包只能先进入本地互联织网，经过本地互联织网内部多级转发，最后离开本地互联织网；而当设置了旁路通路后，该数据包可以直接通过旁路通路离开当前外部设备。旁路控制器应当实现以下功能：

- 确认接收到的数据包目的地是否为本地互联织网；
- 使用旁路通路传输目的地非本地互联织网的数据包。

5.3 信息交互模式

5.3.1 以包为单位的信息传递方式

包是 CIP 协议通信的基本单元，CIB 总线包含输入与输出两个通道，通道内的数据以数据包的形式进行传输，如图 4 所示。

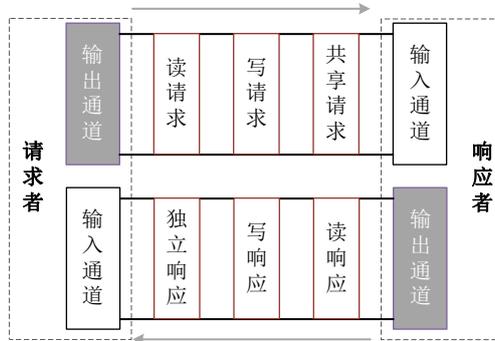


图 4 CIB 总线数据包的收发通道

CIP 协议将包划分为请求包与响应包，且每个请求包都存在对应的响应包。系统运行时，互连网中的传输行为包含请求者向响应者发出请求，以及响应者向请求者返回相应的响应。具体发起请求、返回响应的过程详见第六章：协议适配器与节点。

请求者发出请求

主节点或对等节点的请求者接口通过向指定地址空间写数据的方式，向互连网中的响应者发起请求。其中，向该地址空间写入数据内容包含按指定组织格式发送的事务信息。从节点的请求者接口从外部设备处得到发起请求的信号，从其对应的响应者处获取事务信息。互连接口获取这些信息后，将其打包为请求包发送到网络。响应者在接收到请求包后，互连接口将其解包并执行。

响应者返回响应

响应者执行完请求前，将请求包附带的发起节点 ID 以及事务类型等信息缓存，执行完请求后，将返回的信息以及缓存的信息一同使用互连接口打包后，将其发送到网络。请求者在接收到响应包后，互连接口将其解包并清除消息队列中的事务。

两节点间，完成一次“请求-响应”的处理，即完成了一次事件。由若干事件组成的事务实现 CIP 互连系统中各个节点间的互操作，从而实现节点间信息的交互。

一个 CIP 包包含以下信息：

- 发起节点 ID 以及目标节点 ID；
- 传输过程中的实时信息；
- 传输过程中的纠错/检错码；
- 事务相关信息。

数据包由发起节点生成，在通信链路中传输，最后由目的节点拆解。如图 5 所示，待传输的信息在进入通信链路传输之前，以及经通信链路传输解码后，将遵循以下格式，图中 word 代表 4 个字节的数据。数据包在通信链路中传输时，将增加额外的校验码进行校验。

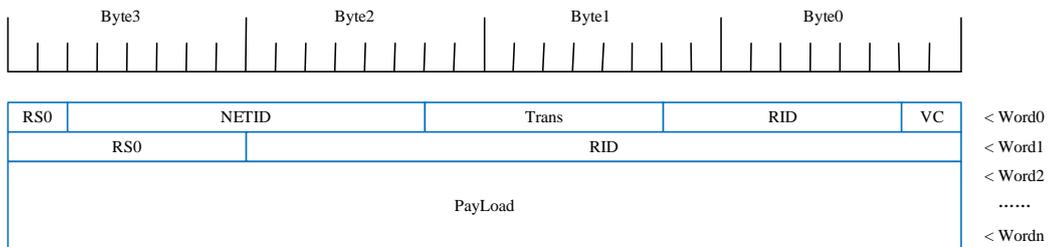


图 5 一般包格式

表 1 展示了一般包中所包含的信息具体定义。

表 3 一般包格式编码

区	名称	位宽	说明
VCID	VCID	2bit	额外路由信息
RTID	RTID	8bit	实时目标节点 ID
Trans	TTP	4bit	事件类型
	TID	4bit	请求者节点产生的事件 ID
NETID	SNID	4bit	发起互联网 ID
	DNID	4bit	目的互联网 ID
	BNID	4bit	缓冲互联网 ID
RID	SRID	8bit	发起节点 ID
	DRID	8bit	目标节点 ID
	BRID	8bit	缓冲节点 ID
Payload	Payload	nbit*	事务特有信息
RS	RS0	2bit	保留
	RS1	8bit	保留

注*：表格中的 n 为 32 的倍数，由具体事务决定。

5.3.2 内存语义的操作模式

CIP 协议采用内存语义的操作模式，所有操作都属于读/写、加载/存储，能够简洁而高效地进行信息交互。

- 对于发起请求的主节点，在其外部设备的视角下，整个互联系统是一片地址空间，进行通信的行为只包含对该地址空间的读写操作，其他节点被协议适配接口所屏蔽而不可见。
- 对于发起请求的主节点，在其协议适配器的视角下，与通信链路进行交互的信息只包含发起数据传输的请求包以及返回的响应包。
- 对于返回响应的从节点，在其中的外部设备视角下，整个互联系统是一个主机，其对该外部设备进行的操作只包含读、写，发起操作的具体节点对外部设备不可见。
- 对于返回响应的从节点，在其协议适配器的视角下，与通信链路进行交互的信息只包含发起数据传输的请求包以及返回的响应包。
- 具体节点间操作过程详见第八章：信息传送过程。

5.3.3 以事务为基础的信息交互方式

在 CIP 互联系统中，信息交互的執行者是节点，节点间传递信息的基本单元是包。两个节点间，交换一次“请求-响应”包的行为称为一个事件，一个事件的執行者包含两个节点。完成一次信息交互的行为称为一个事务，例如完成读/写、DMA 传输等。一个事务可能由一个或多个事件组成，執行者可能包含两个或多个节点，节点间通过完成不同的事务，实现各种信息的交互。

在内存语义的操作模式下，CIP 互联系统中的事务皆表现为读/写、加载/存储操作，各个事务涵盖了主节点、对等节点以及从节点间任意两者的互操作。每个事务都定义了一种信息交互方式，节点间使用不同事务实现信息交互。表 2 列出了 CIP 协议中的事务以及对应的请求、响应。

具体事务流程详见第七章：事务。

表 4 事务及其行为

事务	相关事件	相关包	行为
写事务	写事件	写请求	主节点向从节点给定地址空间写入数据
		独立响应	
读事务	读事件	读请求	主/虚主节点读取来自虚从/从节点给定地址空间的数据
		读响应	
共享事务	共享写事件	共享写请求	主/虚主节点向从/虚从节点写数据并提醒另一主节点读
		独立响应	
	中断事件	中断请求	
		独立响应	
	读事件	读请求	
		读响应	
DMA 事务	DMA 事件	DAM 写请求	由主/虚主节点发起, 在两个从节点间传输数据
		独立响应	
	写事件	写请求	
		独立响应	
	中断事件	中断请求	
		独立响应	
中断事务	中断事件	中断请求	唤起主/对等节点的中断
		独立响应	

写事务

写事务由主节点或对等节点（虚主）发起，将一段数据写入另一对等（虚从）或从节点等目标节点。在事务执行过程中，发起节点作为请求者向目标节点发送包含数据信息的写请求，目标节点作为响应者接收请求后，执行写入操作并返回响应。

读事务

读事务由主节点或对等节点（虚主）发起，从另一对等（虚从）或从节点等目标节点中读取一段数据。在事务执行过程中，发起节点作为请求者向目标节点发送读请求，目标节点作为响应者接受请求后，返回包含待读取数据的响应。

中断事务

中断事务由主节点、从节点或对等节点发起，向另一对等或主节点目标节点发送中断信息。在事务执行过程中，发起节点作为请求者向目标节点发送中断请求，目标节点作为响应者接受请求后，发起中断并返回响应。

共享事务

共享事务由主节点或对等（虚主）节点 A 发起，向从节点 B 中传输一段数据，并提醒其他主节点 C、D、E……读取。在事务执行过程中，节点 A 作为请求者向从节点 B 发送包含数据的共享写请求，节点 B 作为响应者接受请求后，执行操作并向节点 A 返回响应。若共享写请求成功，则随后从节点 B 作为中断请求的发起者与节点 C、D、E……完成中断事件，提醒节点 C、D、E……读取共享数据。最后节点 C、D、E……作为读请求的发起者与从节点 B 完成读事件。

若节点 C、D、E……在规定时间内不去读取节点 B 中共享数据，将触发共享超时机制，对节点 B 中对应的地址空间取消写保护。

DMA 事务

DMA 事务由主节点或对等节点（虚主）A 发起，使得从节点 B 向从节点 C 中传输一段数据。在事务执行过程中，节点 A 作为请求者向从节点 B 发送包含从节点 C 信息的 DMA 请求，从节点 B 接收请求后，向节点 A 返回响应，若 DMA 请求成功，从节点 B 作为写请求的发起者向从节点 C 完成写事件，最后从节点 B 作为请求者向节点 A 完成中断事件，提醒节点 A 完成 DMA 事务。

6 协议适配器与节点

6.1 基本概述

节点由外部设备与对应协议适配器组成，是 CIP 互联系统中通信的参与者。根据实现的功能，协议适配器可分为两部分：设备相关侧与网络相关侧。

根据外部设备与协议适配器的设备相关侧通信行为的不同，将节点分为主节点、从节点以及对等节点。主节点拥有对其他节点发起数据传输请求与接收对应响应的能力，无对其他节点发起的数据传输请求做出响应的能力。从节点拥有对其他节点发起的数据传输请求做出响应的能力，对其他节点无发起数据传输请求的能力。对等节点既能够对其他节点发起数据传输请求，又能对其他节点发起的数据传输请求做出响应。执行事务时，根据具体事务中该节点通信行为的不同可被视为虚主节点或虚从节点。

根据协议适配器网络侧与通信链路的通信行为的不同，将节点分为请求者、响应者。一个节点可以是请求者节点、响应者节点或者“请求-响应”者节点。向响应者发出请求包，并接受对应响应者返回的响应的节点，为请求者节点。从请求者节点接收请求包，并返回对应响应的节点，为响应者节点。

CIP 互联系统根据节点的身份，确定其数据传输的模式。例如：两个主节点之间的通信通过共享事务完成、两个从节点之间的通信通过 DMA 事务完成等（详见第八章：信息传送过程）。

6.2 协议适配器网络相关层

CIP 协议根据节点中协议适配器的网络相关层，将节点划分为请求者、响应者以及“请求-响应”者，表征一个节点对请求包和相应包的处理能力。与之对应地，协议适配器网络相关层中包含请求者接口、响应者接口。

图 6 展示了一个作为请求者的节点的网络相关层视角，其中请求者接口的端口分别包括：

- 使用外部设备本地协议与外部设备通信的端口；
- 响应缓存的输入通道；
- 请求缓存的输出通道。

请求者接口实现以下功能：

- 将外部设备通过本地协议发送的操作信息转化为对应的事务；
- 生成并发送事务相关的请求包；
- 接收并处理通信链路返回的响应包；
- 通过本地协议将事务的结果返回给外部设备。

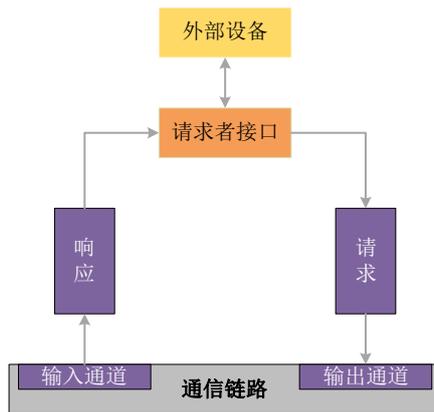


图 6 请求者网络相关层视角

图 7 展示了一个请求者节点的网络相关层视角，其中请求者接口的端口分别包括：

- 使用外部设备本地协议与外部设备通信的端口；
- 缓存响应的输出通道；
- 缓存请求的输入通道。

响应者接口应当实现以下功能：

- 接收通信链路传来的请求包，将其解码为对应的事务；
- 将请求包解包出的操作通过外部设备本地协议发送给外部设备；
- 根据操作结果生成并发送对应的响应包。

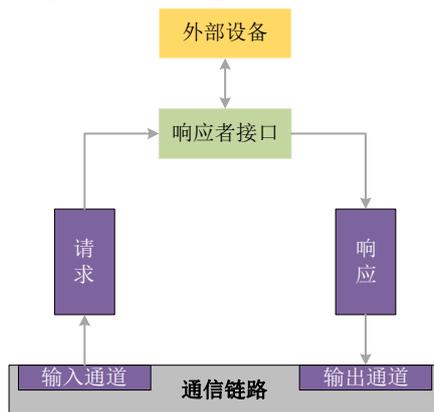


图 7 响应者网络相关层视角

CIP 协议中，一个节点可以既是请求者，又是响应者，对于同时包含请求者和响应者两者行为的节点，其外部设备侧仲裁数据进入请求者接口或响应者接口，互连网络侧使用虚通道将请求包与响应包隔离。

图 8 展示了一个“请求-响应”者节点的网络相关侧视角，其中包括：

- 请求者接口及其对应的请求、响应缓存；
- 响应者接口及其对应的请求、响应缓存；
- 输入通道到请求者接口的响应缓存及响应者接口的请求缓存的仲裁器；
- 输出通道到请求者接口的请求缓存及响应者接口的相应缓存的仲裁器；
- 根据节点身份不同，响应者接口与请求者接口间可能存在的通信通道。

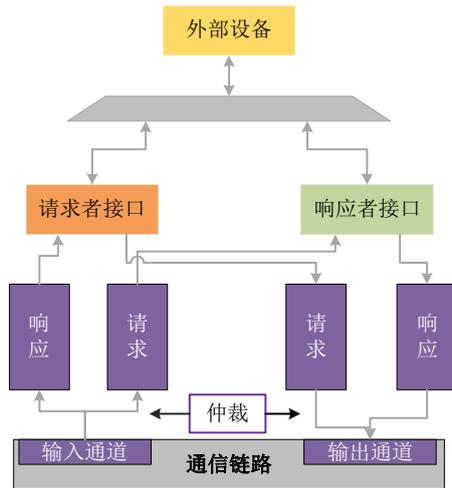


图 8 “请求-响应”者网络相关侧视角

6.3 协议适配器设备相关层

6.3.1 一般设备相关层

协议适配器的设备相关层实现外部设备的本地协议与 CIP 协议的转换。所有类型节点的协议适配器设备相关层包含两类接口：请求者接口、响应者接口。对于主节点、从节点、对等节点，其协议适配器设备相关层具有共同的组成部分。

图 9 展示了一个典型的请求者接口，其中包括：

- 与通信链路连接的一个请求的输出通道以及一个响应的输入通道；
- 与外部设备连接的外部设备本地协议物理通道；
- 将事务信息与外部设备本地协议相互转换的协议转换接口；
- 管理事务的消息队列；
- 将事务信息打包为请求包的包生成器；
- 从响应包中提取事务信息的包解析器；
- 主节点、从节点或对等节点的模块（具体介绍详见 6.3 章节：协议适配过程）。

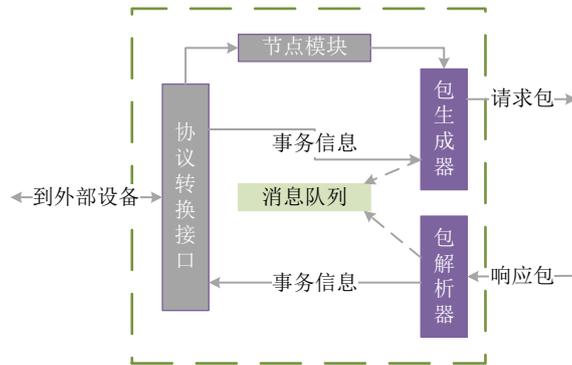


图 9 请求者接口

图 10 展示了一个典型的响应者接口，其中包括：

- 与通信链路连接的一个请求的输入通道以及一个响应的输出通道；
- 与外部设备连接的外部设备本地协议物理通道以及中断输出通道；
- 将事务信息与外部设备的本地协议相互转换的协议转换接口；
- 管理事务的消息队列；
- 缓存返回响应包所需的路由信息及事务信息（请求节点 ID、事务类型等）的缓冲器；
- 将事务信息打包为 CIP 协议响应包的包生成器。

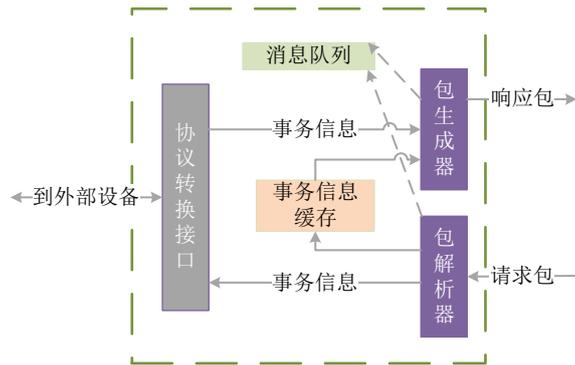


图 10 响应者接口

协议转换接口

存在于请求者/响应者互联接口中，负责将事务信息打包为外部设备本地协议形式或将外部设备本地协议形式的数据解包为事务信息，节点中的协议转换接口其具备以下功能：

- 设备本地协议的数据收发；
- 将设备发出的操作/数据解析为事务信息；
- 将事务信息按照设备协议传输到设备中。

包生成器

包生成器存在于请求者/响应者互联接口中，负责将事务信息转化为数据包，执行包的构造。主节点/对等节点互联网络接口中的包生成器其具备以下功能：

- 接收协议转换接口发出的事务信息并填充对应请求/响应包的事务特有信息字段；
- 根据事件类型、通信链路传输策略分配合适的虚通道，并于包中保存该信息；
- 对关键信息产生校验码作为包的一部分随包发出；
- 请求者接口中的包生成器，接收经 ATU 转化而得的节点信息；
- 请求者接口中的包生成器，生成事件 ID 填充包的自描述信息在消息队列中完成注册；
- 响应者接口中的包生成器，接收事务信息缓存区中的路由信息与事件 ID；
- 响应者接口中的包生成器，在获取到路由信息与事件 ID 后在消息队列中完成注销。

包解析器

包生成器存在于请求者/响应者互联接口中，负责将数据包转化为事务信息，执行包的解析，节点中的包解析器其具备以下功能：

- 接收请求包/响应包，解包其中事务相关信息并发送到协议转换接口；
- 请求者接口中的包解析器，接收响应包并解包后，根据其事务信息在消息队列中完成注销；
- 响应者接口中的包解析器，接收请求包并解包后，将其事务信息发送到事务信息缓存区，同时根据该信息在消息队列中完成注册。

缓冲器

缓冲器存在于响应者互联接口中，负责将接收到的请求包中包含的传输相关的信息以及部分事务信息暂存，主节点/对等节点中的事务信息缓存其具备以下功能：

- 接收并缓存包解析器发来的路由信息与事件 ID 信息；
- 向包生成器发出缓存的路由与事件 ID 信息。

消息队列

消息队列存在于请求者互联接口中，负责记录正在执行的请求包的事件 ID、事务类型。在请求者接口发出请求时，在消息队列中加入上述信息，请求者接收到对应响应时，在消息队列中删除上述信息。

6.3.2 主节点/对等节点设备相关层

在 CIP 互联系统中，主节点能够主动发起数据传输，被动地接收中断信息。因此，主节点的请求者接口中，包含了将节点中外部设备使用本地协议传来的读写内存语义操作转化为具体的事务信息、操作节点等信息的 ATU。同时，在其响应者接口中，包含了中断的输出通道

图 11 展示了一个主节点设备相关层的请求者接口，其中包括：

- 与通信链路连接的一个请求的输出通道以及一个响应的输入通道；
- 与外部设备连接的外部设备本地协议物理通道；
- 将事务信息与外部设备本地协议相互转换的协议转换接口；
- 管理事务的消息队列；
- 管理地址映射服务的 ATU；
- 将事务信息打包为请求包的包生成器；
- 从响应包中提取事务信息的包解析器。

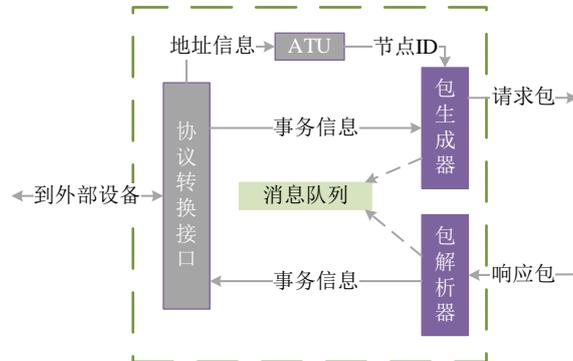


图 11 主节点设备相关层请求者接口

图 12 展示了一个主节点/对等节点设备相关层的响应者接口，其中包括：

- 与通信链路连接的一个请求的输入通道以及一个响应的输出通道；
- 与外部设备连接的外部设备本地协议物理通道以及中断输出通道；
- 将事务信息与外部设备本地协议相互转换的协议转换接口；
- 管理事务的消息队列；
- 缓存返回响应包所需的路由信息及事务信息（请求节点 ID、事务类型等）的缓冲器；
- 将事务信息打包为 CIP 协议响应包的包生成器。

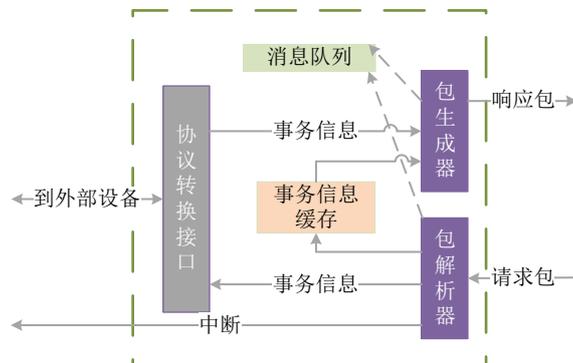


图 12 主节点设备相关层响应者接口

地址映射单元 ATU

ATU 存在于主节点/对等节点请求者协议适配接口中，实现地址空间的分配，每种事务也对应地分配了地址空间，将事务转化为对应地址空间的读写操作。此外，为请求者能够透明地直接访问到响应者的地址空间，CIP 使用 ATU 实现对请求者的地址映射与地址到节点 ID 的转换。请求者中的 ATU 应遵循以下约束：

- ATU 将地址转化为目标响应者 ID 用于互联网中的数据运输；
- ATU 将地址映射到可寻址的资源，例如：DDR 等存储设备、请求者的控制/数据空间；
- ATU 将除读写以外的事务映射到请求者的地址空间中，通过向对应地址写数据完成指定操作。

ATU 由以下方式实现：

- ATU 由三级页表组成，提供地址映射服务，第一级页表表征指向的节点 ID，第二级页表表征指向的页大小，第三级页表指向分配的资源；
- 第一级页表中每个表项包含某响应者节点的 ID 以及第二级页表；
- 第二级页表分配响应者节点中的地址空间；
- 第二级页表支持分配 4KB~64GB 不同大小的页；

- 第二级页表的每个表项指向包含大小相同页的子表，两表项间子表中页大小不同；
- 第三级页表中每个表项指向响应者地址空间中一片地址空间。

ATU 进行地址映射时，如图 13 所示，请求者发起的地址由高到低经查找表映射后，得到目标节点 ID 以及目标节点本地地址空间的偏移量，与请求信息一同经打包后得到请求包。

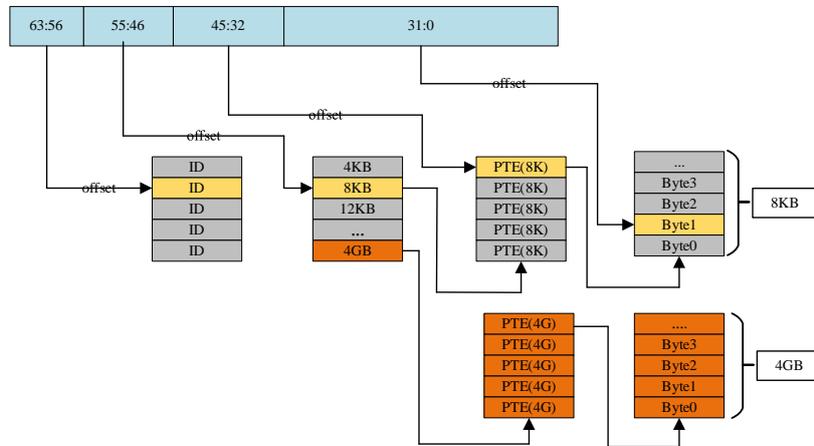


图 13 ATU 映射过程

6.3.3 从节点设备相关层

从节点请求者的互联接口如图 14，它包括：

- 与通信链路连接的一个请求的输出通道以及一个响应的输入通道；
- 与外部设备连接的外部设备本地协议物理通道以及中断通道；
- 若该从节点包含响应者接口，该请求者接口包含与响应者接口连接的节点信息通道；
- 将事务信息与外部设备本地协议相互转换的协议转换接口；
- 管理事务的消息队列；
- 将事务信息打包为请求包的包生成器；
- 从响应包中提取事务信息的包解析器。

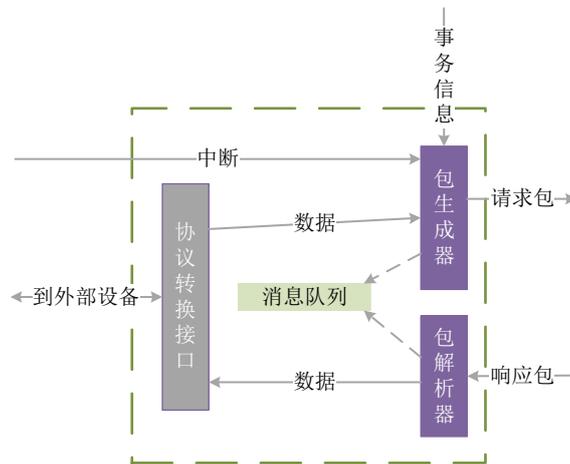


图 14 从节点设备相关层请求者接口

从节点响应者的互联接口如图 15 所示，它包括：

- 与通信链路连接的一个请求包输入通道以及一个响应包输出通道；
- 外部设备连接的外部设备本地协议物理通道；
- 若该节点存在请求者接口，该响应者接口包含与请求者接口连接的节点信息通道；
- 将事务信息与外部设备本地协议相互转换的协议转换接口；
- 管理事务的消息队列；
- 缓存返回响应包所需的路由信息及事务信息（请求节点 ID、事务类型等）的缓冲器；
- 将事务信息打包为响应包的包生成器。

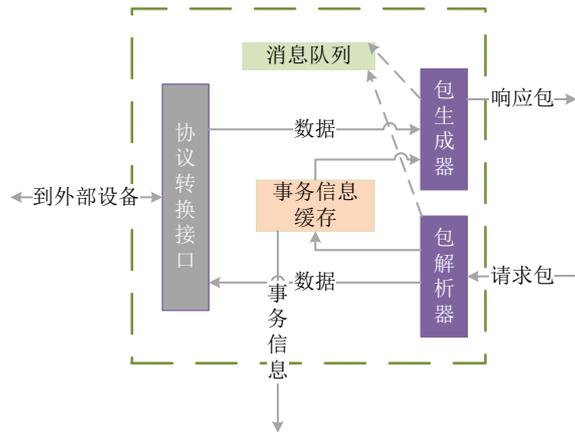


图 15 从节点设备相关层响应者接口

6.4 协议适配过程

6.4.1 主节点/对等节点请求者接口适配过程

主节点/对等节点中的请求者接口通过 ATU 确认通信的目标节点，使用包生成器将协议转换接口的事务信息与 ATU 生成的路由信息一同打包为请求包，其具体流程如图 16 所示：

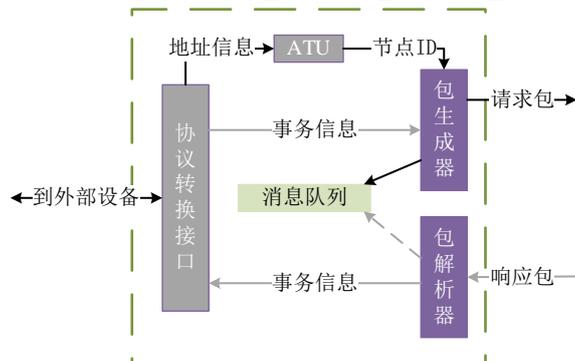


图 16 主节点/对等节点请求者请求适配过程

a) 发起

请求者试图发起通信时，向协议转换接口以本地协议发送与此次通信相关包的信息，CIP 使用内存语义解读设备向互连网络发起的信息：

- 对于读、写事务，设备接口的行为等同与常规读、写。例如使用 AXI 总线接口的设备，执行读写事务时，设备执行读写事务所做的操作与直接访问内存的读写操作无异；
- 对于 DMA 事务、中断事务、共享事务，ATU 将其映射到独立的地址空间，访问对应地址空间即可发起相应事务。例如：向指定地址空间写数据时，协议转换接口根据写入的地址确认执行的事务，根据写入的内容确认包中包含信息。

b) 解码

协议转换接口接收到设备以本地协议发送的信息后，对其进行解码，提取出事务信息，如事务类型、操作地址等。

c) 地址转换

将解码所得的地址信息输入 ATU 中进行转化，得到目标节点 ID 以及目标节点本地的地址偏移。

d) 打包

将解码所得的事务信息输入打包器，得到数据包。

主节点/对等节点中的请求者接收响应包后，使用包解析器提取其中包含的事务信息，根据其信息确认对主节点/对等节点中的外部设备进行的操作。如图 17 所示。

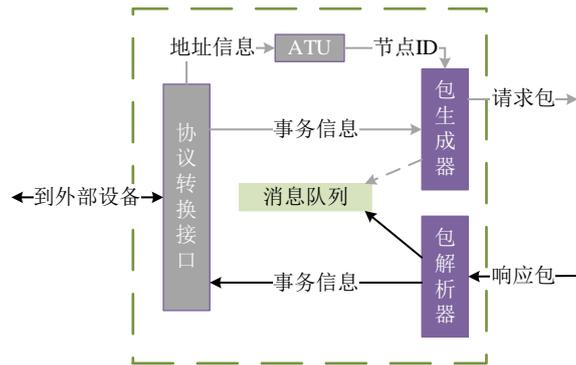


图 17 主节点/对等节点请求者响应适配过程

a) 接收

请求者接口从其响应的输入通道接收到响应包。

b) 处理

响应包进入包解析器，提取其中包含的事务信息后，对其做响应的处理。CIP 中定义了两种响应：独立响应与读响应。

- 若接收到反映操作成功的独立响应，注销消息队列中响应所对应的事务。若接收到反映操作失败的独立响应，仍注销消息队列中响应所对应的事务，并将该信息发送给协议转换接口；
- 若接收到读响应，注销消息队列中该响应对应的事务，并将返回的数据发送给协议转换接口。

c) 打包

协议转化接口将包解析器传来的数据以外部设备本地协议打包并将返回的数据（如果有）回传给外部设备。

6.4.2 从节点请求者接口适配过程

从节点中的请求者接口通过响应者接口传来的事务信息确认通信的目标节点，使用包生成器将协议转换接口传来的数据以及响应者接口传来的事务信息一同打包为请求包，其具体流程如图 18 所示。

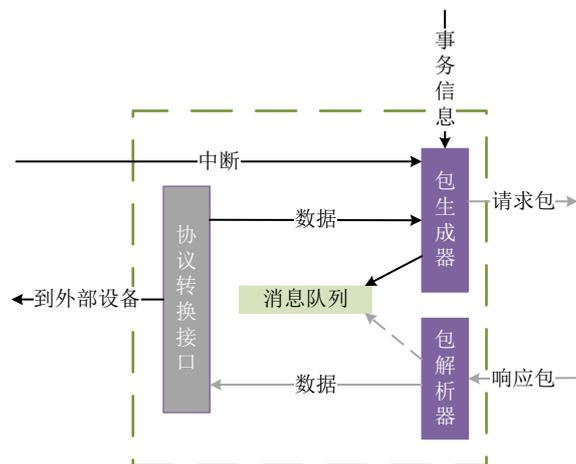


图 18 从节点请求者请求适配过程

a) 发起

外部设备通过本地协议向协议转换接口发送事务相关信息，或通过中断向请求者接口发起中断，从节点发起的请求只包含中断请求及 DMA 事务中的写请求。

- 发起中断请求时，若非事务指定中断的目标节点，则中断请求的目标节点为最近一次操作该从节点的主节点或对等节点，否则中断请求的目标节点为事务指定的节点。
- 对于 DMA 事务中的写请求，其请求包中除数据之外的所有信息都应当由响应者接口传来的事务信息提供。

b) 解码

请求者接口接收到外部设备发送的中断或外部设备本地协议发送的数据后,对其进行解码,提取出事务类型(中断或写数据)、由协议转换接口转换的数据以及响应者接口传来的事务其他信息。

c) 打包

将解码所得的事务类型、事务特有的信息输入打包器,得到数据包。

从节点中的请求者接收响应包后,使用包解析器提取其中包含的事务信息,根据其信息确认对从节点中的外部设备进行的操作,如图 19 所示。

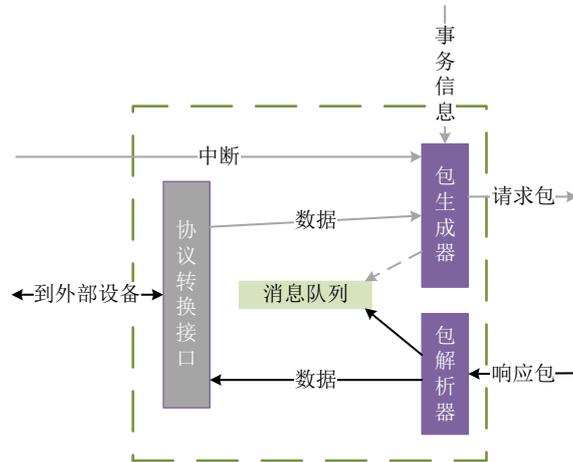


图 19 从节点请求者响应适配过程

a) 接收

请求者接口从其响应的输入通道接收到响应包。

b) 处理

响应包进入包解析器,提取其中包含的事务信息后,对其做响应的处理。CIP 中定义了两种响应:独立响应与读响应。

- 若接收到反映操作成功的独立响应,注销消息队列中响应所对应的事务。若接收到反映操作失败的独立响应,仍注销消息队列中响应所对应的事务,并将该信息发送给协议转换接口。
- 若接收到读响应,注销消息队列中该响应对应的事务,并将返回的数据发送给协议转换接口。

c) 打包

协议转化接口将包解析器传来的数据以外部设备本地协议打包并将返回的数据(如果有)回传给外部设备。

6.4.3 响应者接口适配过程

不论是主节点、从节点还是对等节点,其响应者接口发出的响应包都是由包生成器将事务信息缓存中的信息与协议接口转换的信息一同打包为响应包,发送到通信链路中,其具体流程如图 20、图 21 所示。

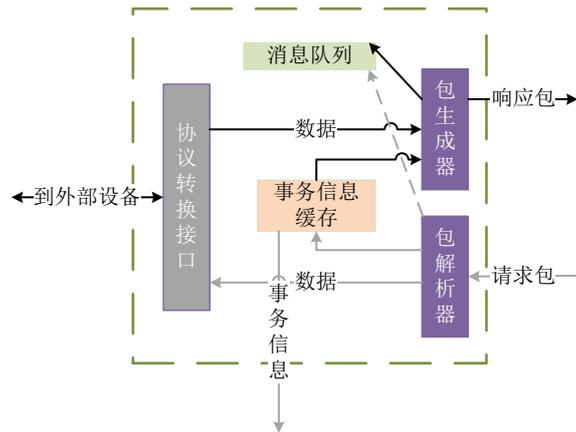


图 20 从节点响应者接口数据适配过程

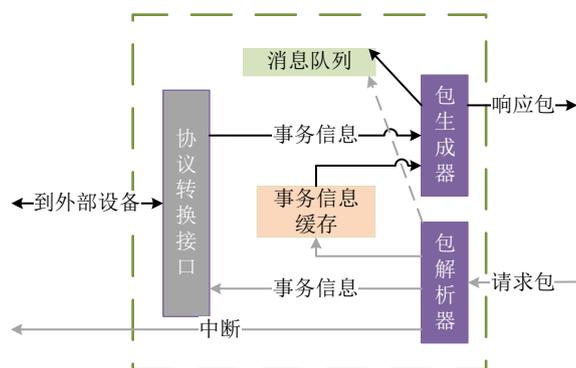


图 21 主节点响应者接口数据适配过程

a) 发起

外部设备在完成某请求包指定的操作后,通过本地协议向协议转换接口返回请求包对应的响应信息。

b) 解码

响应者接口接收到外部设备发送的数据后,对其进行解码,CIP 协议定义了两种响应类型:独立响应与读响应。

- 若为独立响应,则确认操作的正负性并发送给包生成器;
- 若为读响应,则将发送来的数据解码并发送给包生成器。

c) 打包

将协议转换接口传来的信息与事务信息缓存中的事务信息一同打包,生成响应包。

主节点或对等节点响应者接口接受请求后,由包解析器将请求解包为事务信息,在事务信息缓存中暂存该事务信息,并通过协议转换接口或中断接口传递给外部设备。从节点与主节点/对等节点类似,由包解析器将请求解包为事务信息,在事务信息缓存中暂存该事务信息,并通过协议转换接口传递给外部设备,如图 22、图 23 所示。

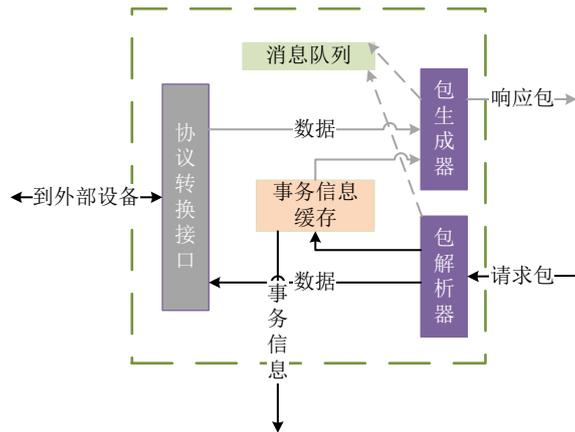


图 22 从节点响应者请求数据适配过程

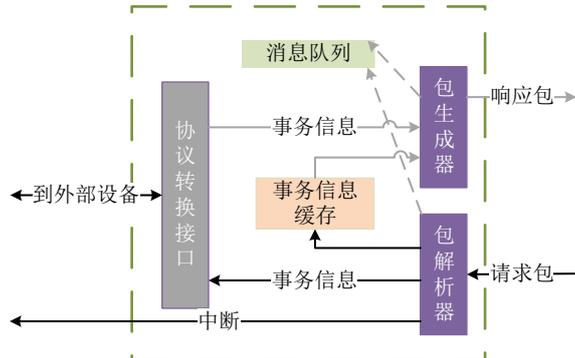


图 23 主节点/对等节点响应者请求数据适配过程

a) 接收

响应者接口从通信链路中接收请求包。

b) 解码

请求包进入包解析器，从中提取事务信息后，将操作发送给协议转换接口或中断接口。

c) 注册

解包完成后，根据其事务 ID 在消息队列中注册该事务。

d) 暂存

与注册并行进行，包解析器解包得到的事务信息同时发送到缓冲器存储。

- 从节点中，暂存的事务信息与其请求者接口相连（如果有），为其提供请求包的目标节点；
- 主节点或对等节点中，暂存的事务信息只用于指定接收请求后返回的响应包的目标节点。

7 事务

7.1 基本概述

在 CIP 互联系统中，节点间使用事件进行通信。一个事件包含一对“请求-响应”包。整个事件的流程从请求者节点发起请求开始，到请求者接收到对应响应结束。一次事件代表一次完整的操作，具体包括：

- 读事件：请求者节点从目标节点读出一段数据。
- 写事件：请求者节点向目标节点写入一段数据。
- 中断事件：请求者节点向目标节点发起中断。
- DMA 事件：请求者向目标节点发起 DMA 事务（具体介绍详见 7.5 章节：DMA 事务）。
- 共享写事件：请求者向目标节点发起共享事务（具体介绍详见 7.6 章节：共享事务）。

在 CIP 互联系统中，节点间使用事务进行完整消息传送。一个事务包含一个或多个事件（具体介绍详见 5.3.3 章节：以事务为基础的信息交互方式）。整个事务的流程从请求者节点发起事务中第一个事件请求开始，到请求者节点接收到最后一个事件的响应结束。一个事务代表一次完整的消息传送，具体包括：

- 读事务：主节点/对等节点（虚主）完成一次从对等节点（虚从）/从节点读取数据。
- 写事务：主节点/对等节点（虚主）完成一次向对等节点（虚从）/从节点写入数据。
- 中断事务：从节点/对等节点/主节点完成一次向主节点/对等节点（虚主）发起中断。
- 共享事务：主节点/对等节点（虚主）完成一次与另一主节点/对等节点（虚主）的数据传输。
- DMA 事务：主节点/对等节点（虚主）完成一次两从节点间的数据传输。

独立响应

独立响应是一种写请求、中断请求、DMA 请求、共享写请求的响应行为，其信息由独立响应包携带，响应的正负性反映一个请求是否被正确地执行。一个独立响应包包含有以下信息：

- 自身节点 ID、目标节点 ID、包 ID；
- 响应对应的请求包的事务类型；
- 响应的正负性。

请求者在接收到独立响应包时，应当执行以下操作：

- 若请求队列中存在与之匹配的请求，且独立响应为正，则完成请求对应的事务；
- 若请求队列中存在与之匹配的请求，且独立响应为负，则唤起事务失败处理流程；
- 若请求队列中无与之匹配的请求，将其丢弃且不做任何操作。

独立响应包中，其事务信息编码格式如图 24 所示，本章只介绍 payload 域的编码，payload 域以外的编码具体详见 5.3.3 章节。

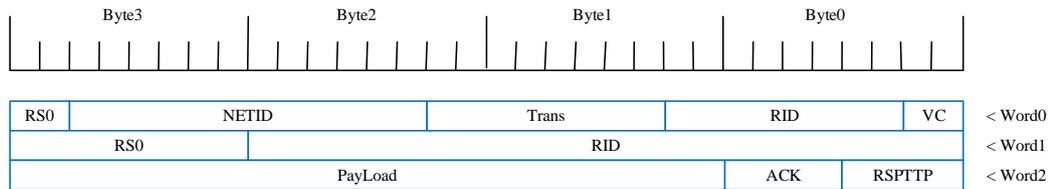


图 24 独立响应包格式

表 5 独立响应编码

区	名称	位宽	说明
Payload	RSPTTP	4bit	响应的事务类型
	ACK	4bit	响应的正负性： 0x0:操作失败 0xF:操作成功

7.2 读事务

读事务用于发起节点从目标节点的指定地址中读取若干长度的数据，其中发起节点作为请求者发起读请求，目标节点作为响应者接收请求并返回带数据的读响应。

请求者通过发起读请求以读取指定起始地址后的若干长度数据。响应者接收到读请求后，对请求者返回携带读数据的读响应，其流程如图 25 所示。

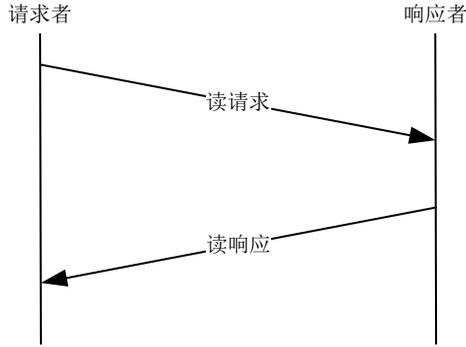


图 25 读事务流程

- a) 请求者发起携带目标地址、长度等信息的读请求;
- b) 响应者接收到请求后, 解析出其中的地址、长度等信息, 读取相应数据, 生成并发送读响应包;
- c) 请求者接收到读响应后, 解包得到其中的数据, 完成读事务。

执行读事务时, 请求者不必等待上一次读事件的读响应到达即可发起另一次的读请求, 请求者根据读响应中的事件 ID 对接收到的乱序数据进行重排序。支持乱序读取的特性能够均衡通信链路负载, 充分利用通信链路带宽资源, 提高传输效率。图 26 展示了一种乱序重排的情况: 请求者先后向响应者 1、响应者 0 发送读请求 A、读请求 B。随后先后接收到读响应 A、读响应 B。请求者接口能够根据读响应 A、B 中的事件 ID 将读取的数据存储到正确的地址中。

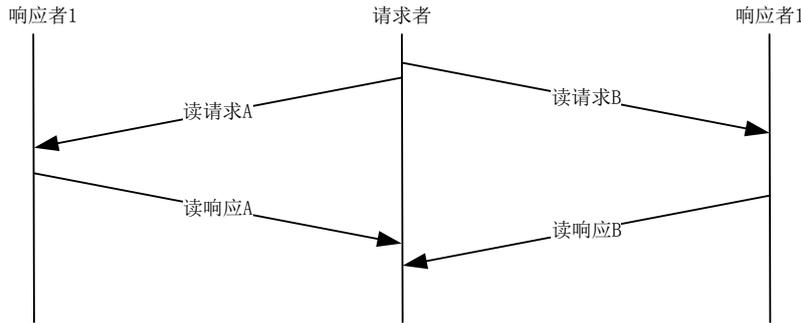


图 26 读事务乱序重排

读请求包中, 其事务特有信息编码格式如图 27 所示, 本章只介绍 payload 域的编码, payload 域以外的编码具体详见 5.3.3 章节。

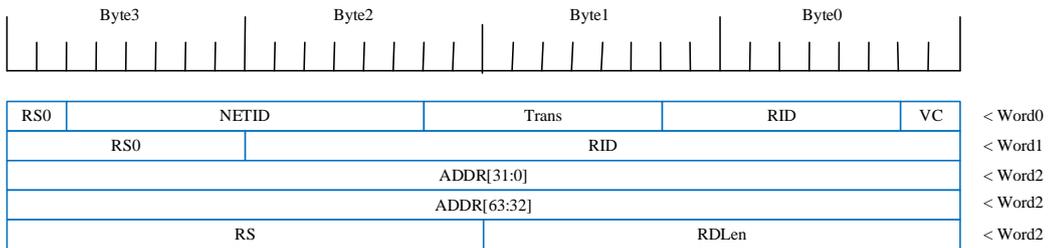


图 27 读请求包格式

表 6 读请求编码

区	名称	位宽	说明
Payload	ADDR	64bit	响应者本地待读取数据地址
	RDLen	16bit	待读取的数据长度

读响应包中, 其事务特有信息编码格式如图 28 所示, 本章只介绍 payload 域的编码, payload 域以外的编码具体详见 5.3.3 章节。

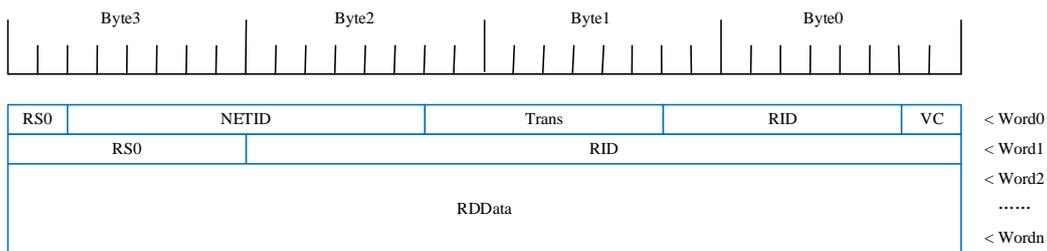


图 28 读响应包格式

表 7 读响应编码

区	名称	位宽	说明
Payload	RDData	nbit	读取的数据

7.3 写事务

写事务用于发起节点向目标节点的指定地址中写入若干长度的数据。其中发起节点作为请求者发起读请求，目标节点作为响应者接收请求并返回响应。

请求者通过发起写请求以向响应者的指定地址空间中写入若干长度数据，响应者接收到写请求后，对请求者返回独立响应其流程如图 29 所示。

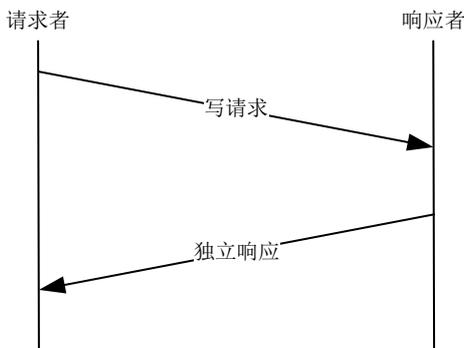


图 29 写事务流程

- 请求者发起携带目标地址、数据以及数据长度的写请求；
- 响应者接收请求后，将其中地址解码，定位到相应资源，生成并发送独立响应包；
- 请求者接收到独立响应后，根据响应的正负性做后续处理。

执行写事务时，要求一次写事件必须严格完成后，才能继续下一次写事件，即请求者收到由从设备返回的独立响应后，才能开始下一次写数据事务，且接收到的独立响应包 ID 需与当前发送的写请求 ID 相同，如图 30 所示。

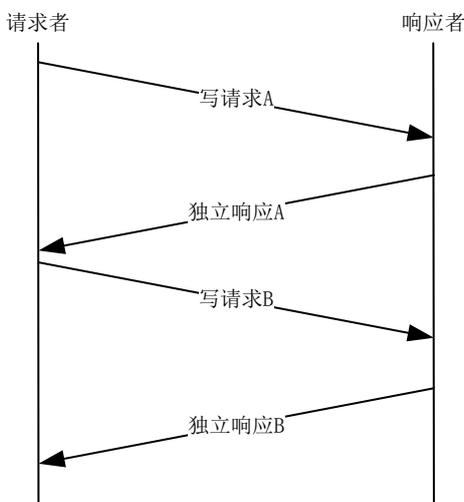


图 30 两次独立的写事务

写请求包中，其事务特有信息编码格式如图 31 所示，本章只介绍 payload 域的编码，payload 域以外的编码具体详见 5.3.3 章节。

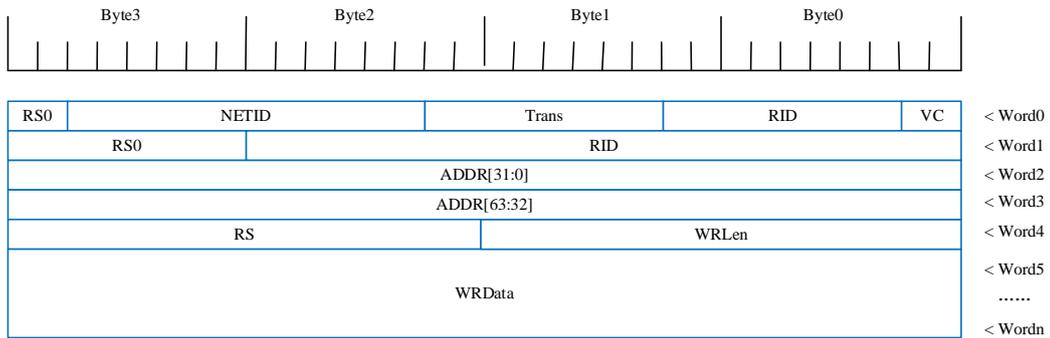


图 31 写请求包格式
表 8 写请求编码

区	名称	位宽	说明
Payload	WRAddr	64bit	响应者本地待写入地址
	WRLen	16bit	写入的数据长度
	WRData	nbit*	写入的数据
	RS	16bit	保留

注*: n 的大小与 WRLen 相关。

7.4 中断事务

中断事务用于发起节点向目标节点发送中断信息。其中发起节点作为请求者发起中断请求，目标节点作为响应者接收中断请求并返回响应。中断不仅可作为单独的事务，也可作为 DMA、共享事务的一部分。在 CIP 互连系统中，发起中断的节点应当包含一个请求者接口用于发送请求，接收中断的节点应当包含一个响应者用于发送响应。

中断事务执行过程中，请求者向待中断设备发起中断请求，响应者接收到中断请求后，处理中断并发送独立响应，其流程如图 32 所示。

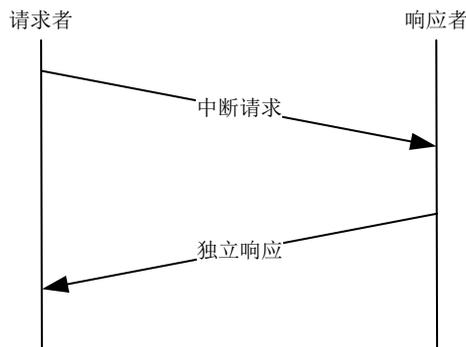


图 32 中断事务流程

- 请求者发送携带中断向量的中断请求；
- 响应者接收中断请求后，返回独立响应；
- 请求者接收独立响应后，根据其正负性做后续处理。

与写事务相同，要求一次中断事件必须严格完成后，才能继续下一次中断事件。一旦发生丢包的情况，系统存在端口卡死的风险，请求者接口对每个中断请求进行计时，当中断请求超时，则唤起超时处理流程（具体介绍详见 5.2.3 章节：以事务为基础的信息交互方式）。

中断请求包中，其事务信息编码格式如图 33 所示，本章只介绍 payload 域的编码，payload 域以外的编码具体详见 5.3.3 章节。

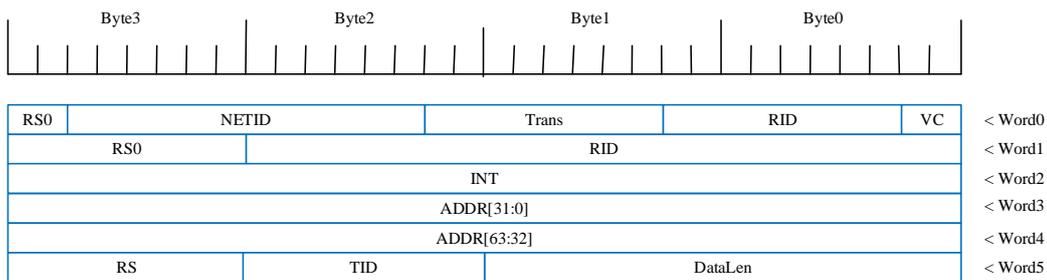


图 33 中断请求包格式

表 9 中断请求编码

区	名称	位宽	说明
Payload	INT	32bit	响应者的中断向量
SharedInfo*	ADDR	32bit	共享数据地址
	RS	8bit	保留
	TID	8bit	持有共享数据的节点 ID
	DataLen	16bit	共享数据长度

注*: 该字段仅在共享事务中使用，DMA 事务、中断事务中的中断请求包不包含该字段。

7.5 DMA 事务

DMA 事务发生在节点 A（主/虚主节点）、节点 B（从/虚从节点）和节点 C（从/虚从节点）三个节点之间，用于节点 B 和节点 C 间的数据传输。其中节点 A 作为请求者发送 DMA 请求，配置对应的信息并发起 DMA 传输，节点 B 作为响应者接收 DMA 请求并向节点 A 返回响应，随后节点 B 与节点 C 开始交换数据。其流程如图 34 所示。

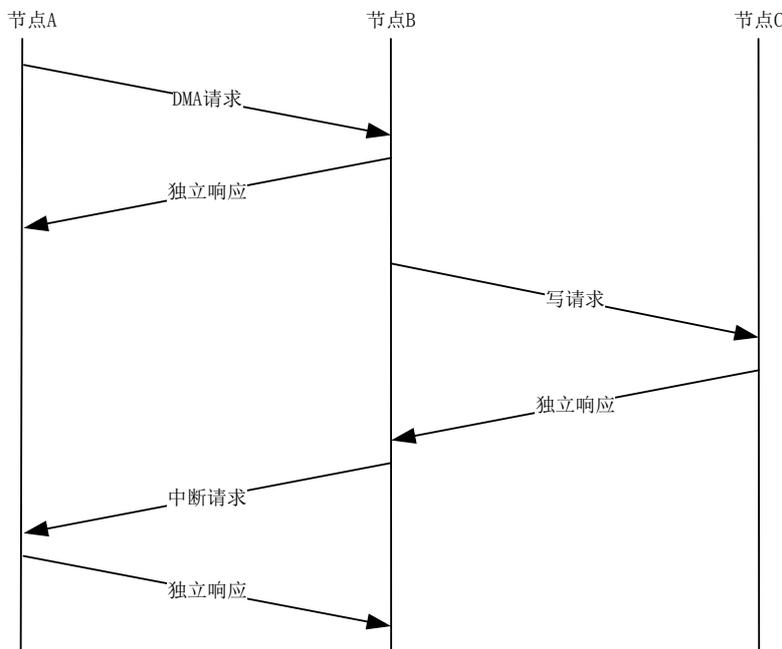


图 34 DMA 事务流程

- 节点 A 向节点 B 发送 DMA 请求，节点 B 接收到 DMA 请求后，向节点 A 返回独立响应以表示收到请求；
- 节点 B 作为请求者向节点 C 发起写请求，将节点 A 指定的数据写入节点 C，节点 C 接收到数据后，返回独立响应；

c) 待节点 B、C 之间数据传输完成后，节点 B 作为请求者向节点 A 发起中断事务，提醒节点 A 本次 DMA 传输完成。

与读事务相似，DMA 请求支持乱序重排，节点 B 应当根据事务 ID 对不同的 DMA 事务做出区分，以对不同的 DMA 事务的结果做出正确处理。

DMA 请求包中，其事务信息编码格式如图 35 所示，本章只介绍 payload 域的编码，payload 域以外的编码具体详见 5.3.3 章节。

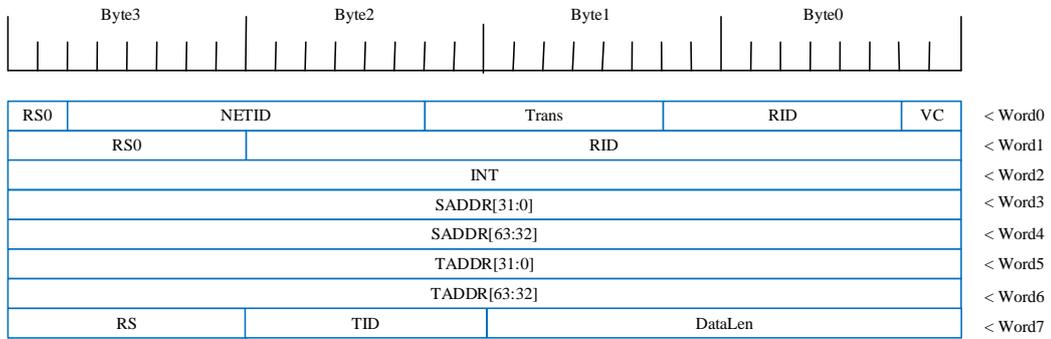


图 35 DMA 请求包格式
表 10 DMA 请求编码

区	名称	位宽	说明
Payload	INT	32bit	节点 A 的中断向量
	SADDR	32bit	节点 B 中待传输的数据地址
	TADDR	32bit	节点 C 中目标地址
	TID	8bit	节点 C 的 ID
	DataLen	16bit	待传输的数据长度

7.6 共享事务

共享事务发生在节点 A（主/虚主节点）、节点 B（从节点）、节点 C、D、E……（主/虚主节点）之间，用于节点 A 与节点 C、D、E……之间的数据传输。节点 A 向节点 B 写入数据，写完之后由节点 B 通知节点 C、D、E……有新的数据写入。

共享事务执行期间，数据流通发生在三个节点间：节点 A 将数据写入节点 B 并通知节点 C、D、E……。其流程如图 36 所示。

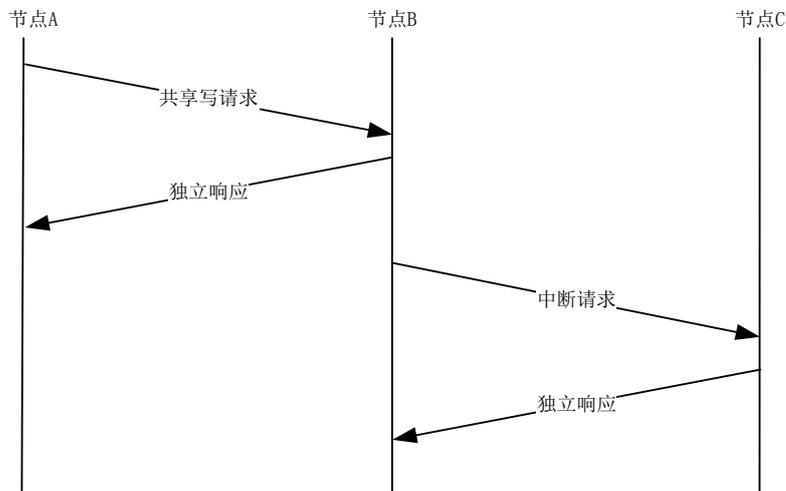


图 36 共享事务流程

- a) 节点 A 向节点 B 发送共享请求，节点 B 收到请求后向节点 A 返回独立响应；
- b) 节点 B 作为请求者向节点 C、D、E……发起中断事务。

由于共享事务过程中，一片共享地址空间需被共享对象读取后才能再次被写入，若多个主节点对同一片共享地址空间进行操作会出现端口阻塞的风险。CIP 协议采用共享超时机制，规定对每片共享地址空间进行计数，超时则将清除对应地址空间的写保护。

共享请求包中，其事务特有信息编码格式如图 37 所示，本章只介绍 payload 域的编码，payload 域以外的编码具体详见 5.3.3 章节。

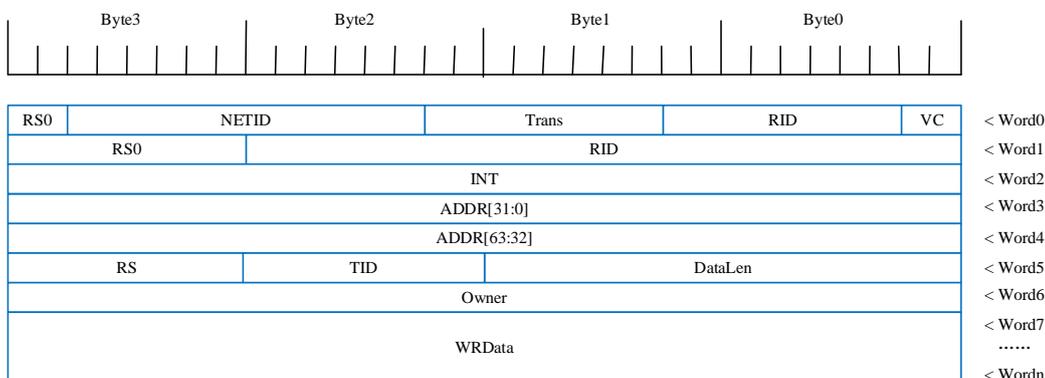


图 37 共享请求包格式

表 11 共享请求编码

区	名称	位宽	说明
Payload	ADDR	32bit	节点 B 中待写入的地址
	DataLen	16bit	待写入的数据长度
	TID	8bit	节点 C 的 ID
	WRData	nbit①	待写入的数据
	Owner②	32bit	共享对象的节点列表

注①：表格中的 n 与 DataLen 相关。

注②：Owner 使用独热码对节点进行编码，对多个节点进行共享使用或。例如节点编号为 32'b1000 与节点编号为 32'b10 的节点均为此次共享的对象，Owner 域则置为 32'b1010。

8 信息传送过程

8.1 基本概述

在 CIP 互联系统中，参与通信的执行为节点，根据节点身份的不同，分为主节点、从节点、对等节点。不同身份间的信息传送方式不同，如主-主、主-从、对等-从等。本章介绍 CIP 互联系统中，使用第七章：事务所介绍的事务完成节点间信息的传送过程；以及执行事务时，信息从某节点进入通信链路，最后到达另一节点的全过程。大部分待传递的信息都包含读/写的数据，只有主节点以及对等节点能够主动地发起数据传输，故大部分信息的传送过程都是由主节点或对等节点发起。特别地，中断信息不包含读写数据，故中断信息的传送过程可由主节点、从节点以及对等节点三种中任意身份的节点发起。

8.2 重传机制

CIP 协议中，所有请求都支持超时重传。节点在发出请求 0 时，对请求 0 进行看门狗计数，若超时则触发重传机制：使用另一事件 ID，发起表征与请求 0 相同操作的请求 1。若在系统运行过程中，节点在请求 0 超时后接收到其对应的响应，则将其丢弃，不做任何处理。通信链路堵塞、数据包传输错误、响应者忙碌等情况可能触发超时重传。

图 38 展示了一种超时重传的情况：

- a) 请求者节点向响应者节点发起请求 0 并进行计时，其事件 ID 为 0；
- b) 响应者节点没有立即处理请求 0，直到请求 0 超时。

c) 请求者节点在请求 0 超时后，向响应者节点发起表征与请求 0 相同操作的请求 1，其事件 ID 为 1。

d) 响应者节点接收到请求 1 后，陆续执行请求 0、请求 1 中的操作，并分别返回事件 ID 为 0、1 的响应。

e) 请求者节点接收到事件 ID 为 0 的响应 0，由于请求 0 已超时，将响应 0 丢弃，不做任何处理。

f) 请求者节点接收到事件 ID 为 1 的响应 1，此时请求 1 未超时，对响应 1 做相应处理，完成事件。

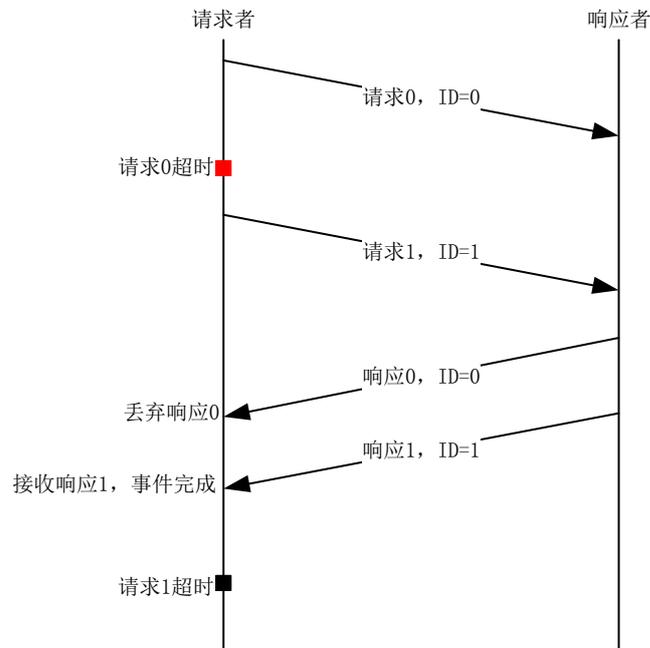


图 38 CIP 协议的重传机制

8.3 从节点中断信息传送过程

8.3.1 传送流程说明

中断操作的目的在于提醒某操作完成、发起某数据处理流程或提醒某节点发起数据传送等。故大多中断操作的接收者为有能力发起数据传送的主/虚主节点。对于发起中断的节点而言，中断源既可以是节点中的外部设备，也可以是协议适配器。

CIP 使用中断事务完成中断信息的传送，其发起者作为请求者发送中断请求，接收者作为响应者接收到请求后，做出对应操作并返回响应。

从节点由外部设备拉起其请求者接口中的中断端口引发中断。以从节点 DDR 向主节点 MPU 发送中断为例，介绍单拓展互联芯粒内与多拓展互联芯粒间的传送，二者传送过程相似，多拓展互联芯粒间的传送相较于单拓展互联芯粒内的传送增加了扩展端口的传输以及数据包本地数据链路或旁路通路的判断。

8.3.2 单拓展互联芯粒中的传送

DDR 通过中断事务向 MPU 发出中断，二者通过同一片拓展互联芯粒互联，其流程如图 39 所示，由于传输在统一拓展互联芯粒中进行，图中未体现出旁路通路。

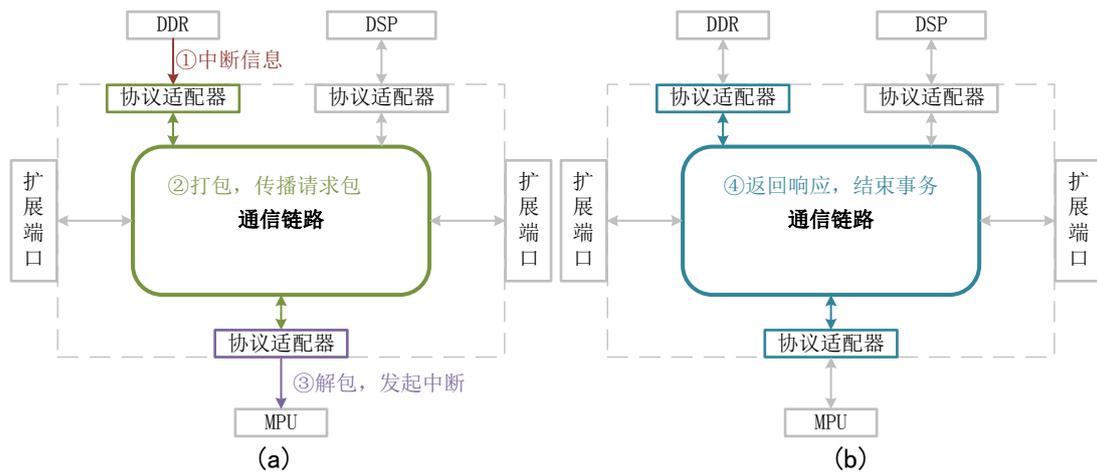


图 39 单扩展互联芯粒内的中断流程

a) MPU 在此之前已向 DDR 发送过 DMA 指令，在传送完成后，DDR 的请求者接口将生成中断信息，如图 39 (a) 所示；

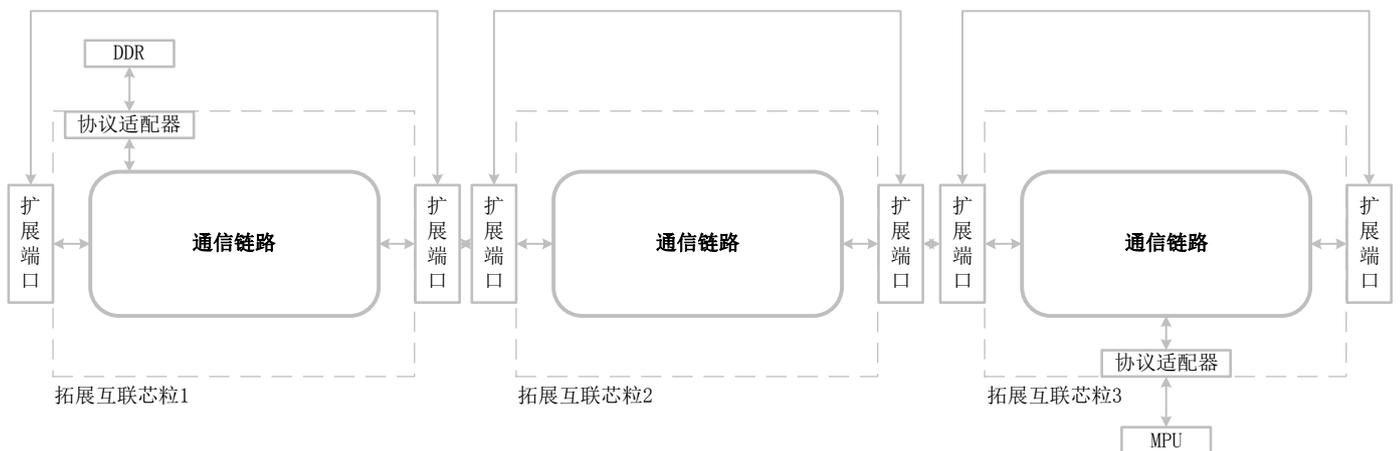
b) DDR 所在节点请求者接口接收中断信息，从其对应的响应者接口处获取上次操作本节点的节点，及其对应的中断向量，并将这些信息打包为中断请求包格式，由通信链路转发到 MPU 所在节点处，如图 39 (b) 所示；

c) MPU 所在节点的响应者接口接收到中断请求，将解包的信息记录并发起 MPU 中对应的中断，如图 39 (b) 所示；

d) MPU 所在节点响应者将记录的事务信息一同打包为独立响应包，通过通信链路返回给 DDR 所在节点，DDR 所在节点将接收到的响应包解包，确认其事务 ID 后结束事务，如图 39 (b) 所示。

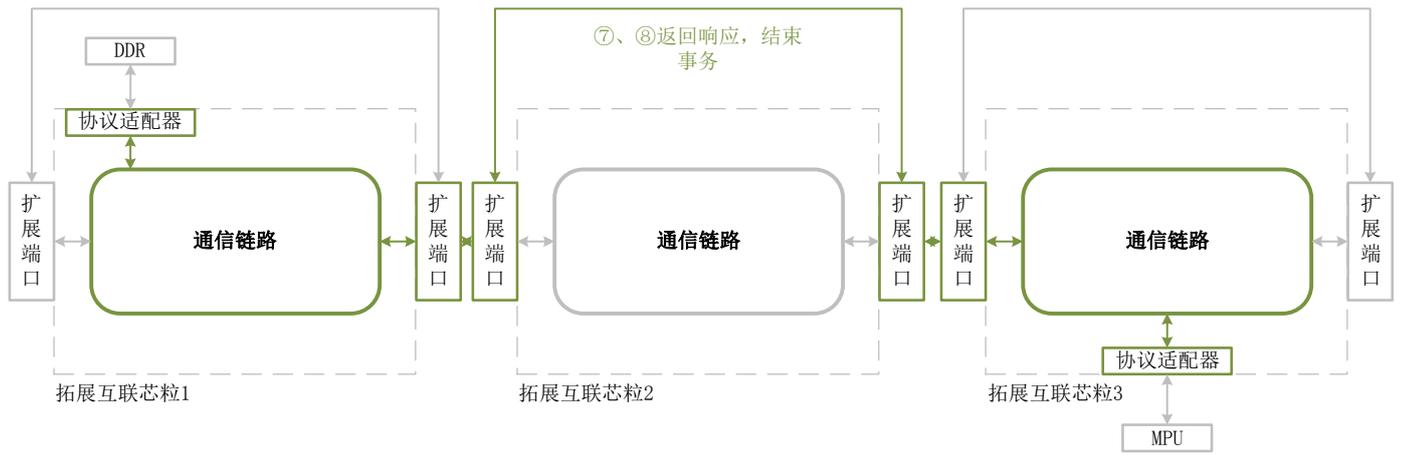
8.3.3 多拓展互联芯粒间的传送

DDR 通过中断事务向 MPU 发出中断。如图 41 (a) 所示，二者通过不同拓展互联芯粒互联，二者之间存在一个拓展互联芯粒，其流程如图 41 所示。

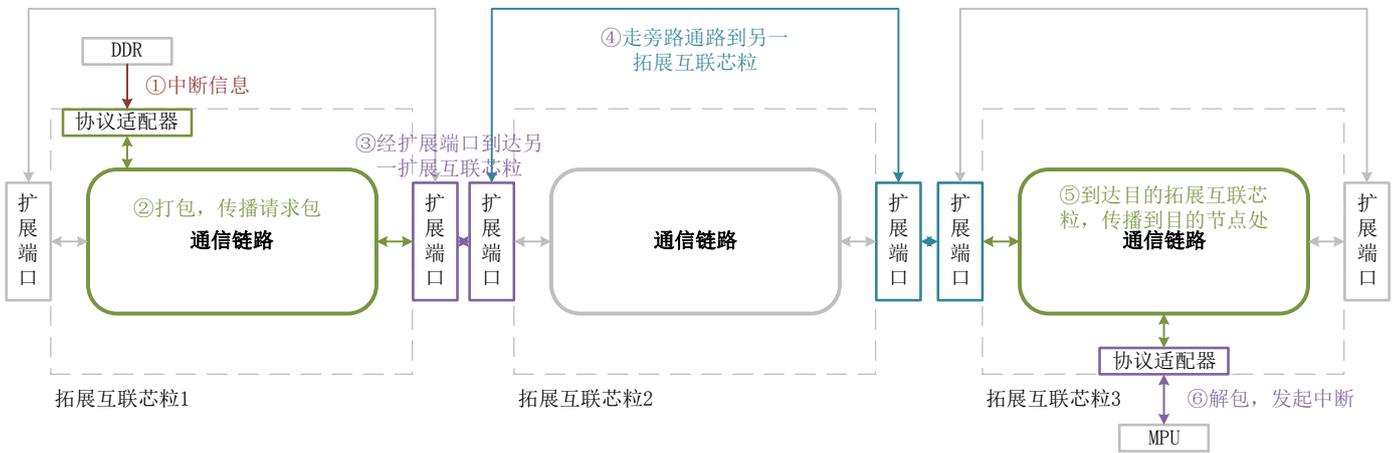


(a)

图 40 多扩展互联芯粒间的中断流程(第 1 页/共 2 页)



(b)



(c)

图 41 多扩展互联芯粒间的中断流程 (第 2 页/共 2 页)

a) MPU 在此之前已向 DDR 发送过 DMA 指令，在传送完成后，DDR 的请求者接口将生成中断信息，如图 41 (b) 所示；

b) DDR 所在节点请求者接口生成中断信息后，从其对应的响应者接口处获取上次操作本节点的节点，及其对应的中断向量，并将这些信息打包为中断请求包格式。由于目标节点在另一拓展互联芯粒上，故中断请求包由通信链路转发到扩展端口处，如图 41 (b) 中②所示；

c) 扩展端口接收到中断请求包后，将包发往拓展互联芯粒 1 的扩展端口，如图 41 (b) 中③所示。

d) 拓展互联芯粒 2 的扩展端口接收到中断请求包后，判断此数据包目的是否在本拓展互联芯粒上，判断结果为否，则将该包经旁路通路传送到拓展互联芯粒 2 的另一扩展端口，并通过此端口将该包传送到拓展互联芯粒 3。如图 41 (b) 中④所示。

e) 拓展互联芯粒 3 的扩展端口接收到中断请求包后，判断此数据包目的是否在本拓展互联芯粒上，判断结果为是，则将该包经本地数据通路传送到目的 MPU 所在节点处。如图 41 (b) 中⑤所示

f) 目的 MPU 所在节点接收到中断请求包，解包并执行中断。如图 41 (b) 中⑥所示。

g) MPU 所在节点执行完中断请求后，生成中断响应包，该包依次经过拓展互联芯粒 3 的数据通路、拓展互联芯粒 2 的旁路通路以及拓展互联芯粒 1 的数据通路，最终到达 DDR 所在节点，DDR 所在节点接收到中断响应包后，事务结束。如图 41 (c) 所示。

8.4 主节点-从节点数据传送过程

主节点拥有发起数据传送的能力，从节点拥有对数据传送做出响应的能力，故主节点与从节点间可进行简单的读/写事务以完成数据传送。

对于主节点-从节点的数据传输由主节点主导，负责作为请求者发起读、写事务，从节点作为响应者，对接收到的请求做出对应的响应。故存在主节点-从节点数据传输的主节点，其互联接口需包含一个请求者接口以发出读/写请求，同样地，存在主节点-从节点数据包传输的从节点其互联接口需包含一个响应者接口以接收读/写请求并返回响应。

多拓展互联芯粒间的传送相较于但拓展互联芯粒内的传送增加了扩展端口的传输以及数据包本地数据链路或旁路通路的判断，具体详见 8.3.3 章节，此处仅介绍单拓展互联芯粒内的传送。以主节点 MPU 对从节点 DDR 发起读/写事务为例，其流程如图 42 所示：

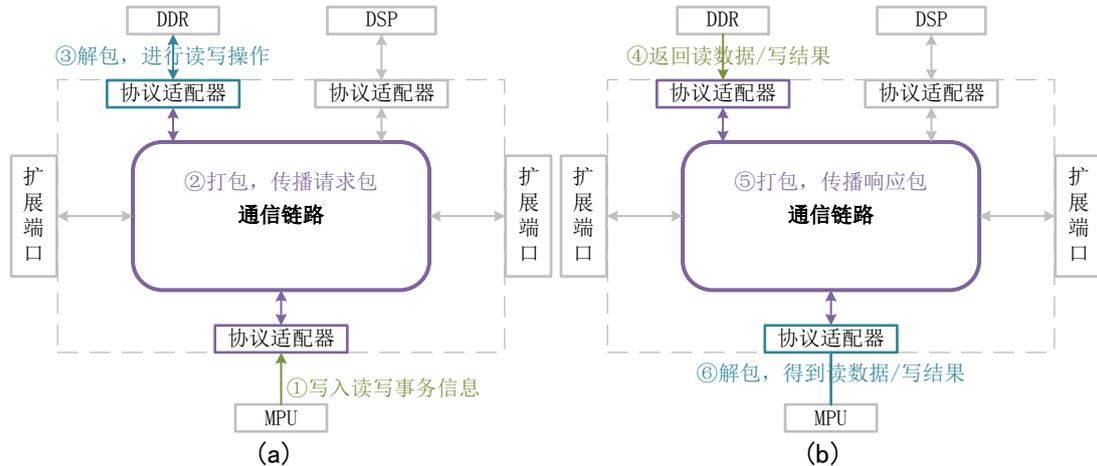


图 42 主节点-从节点数据传送过程

- MPU 向指定的地址空间写入读/写事务信息，发起读/写操作，如图 42 (a) 所示；
- MPU 所在节点请求者接口接收事务信息，并将这些信息打包为读/写请求包格式，由通信链路转发到 DDR 所在节点处，如图 42 (a) 所示；
- DDR 所在节点的响应者接口记录请求的解包信息，并将读/写操作传递给 DDR，如图 42 (b) 所示；
- DDR 将读出的数据、写操作完成标志通过 DDR 控制器本地协议传递其响应者接口处，如图 42 (b) 所示；
- DDR 所在节点响应者将 DDR 读出的数据与记录的事务信息一同打包为独立响应/读响应包，通过通信链路返回到 MPU 所在节点处，如图 42 (b) 所示；
- MPU 所在节点请求者接口将接收到的响应包解包，如图 42 (b) 所示。

8.5 主节点-主节点数据传送过程

主节点只有发起数据传送的能力而无对数据传送进行响应的能力，故主节点与主节点间的数据传送以共享事务实现。由其中一个主节点发起，向某从节点写入一段数据后，该从节点提醒另一主节点读取数据。

对于主节点-主节点的数据传送，发起主节点作为请求者发送共享请求，从节点需作为响应者接收共享请求，并作为请求者发送中断请求，目标主节点需作为响应者接收中断请求，并作为请求者发起读事务。故存在主节点-主节点数据传输的发起主节点，其互联接口需包含一个请求者接口；而从节点与目标主节点，其互联接口需同时包含一个请求者接口与一个响应者接口。

多拓展互联芯粒间的传送相较于但拓展互联芯粒内的传送增加了扩展端口的传输以及数据包本地数据链路或旁路通路的判断，具体详见 8.3.3 章节，此处仅介绍单拓展互联芯粒内的传送。以主节点 MPU 向从节点 DDR 发起共享事务，将写入共享数据通知主节点 DSP 读取的过程为例，其流程如图 43 所示：

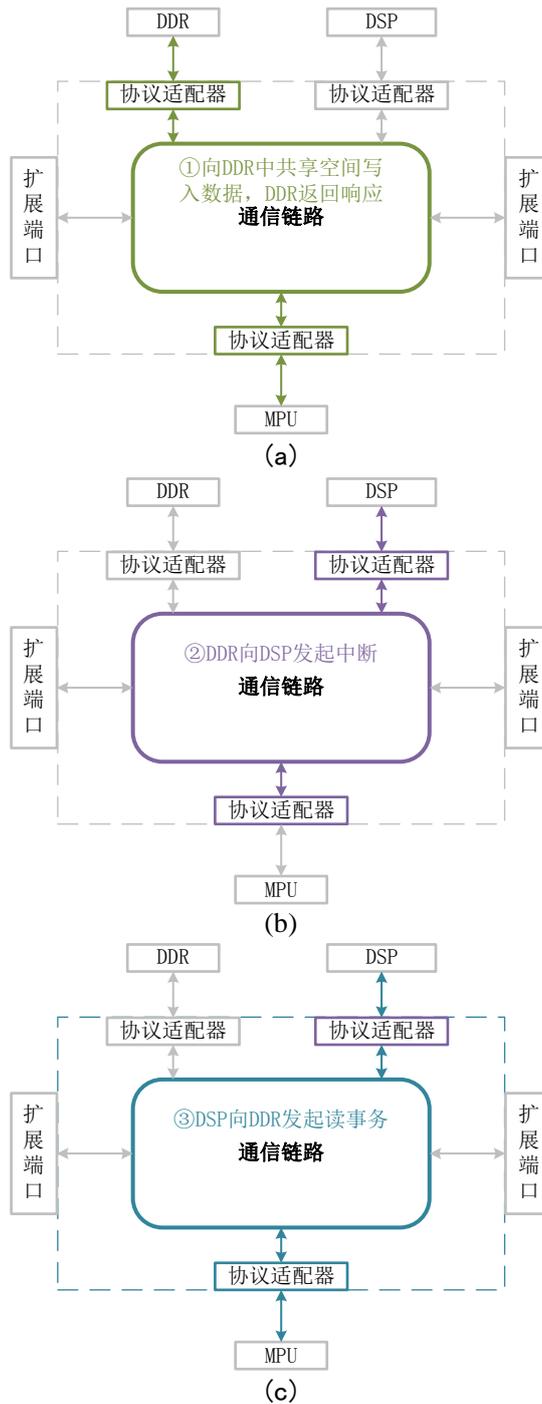


图 43 主节点-主节点数据传送流程

- a) MPU 配置请求者接口的共享事务信息，发起共享写请求，如图 43 (a) 所示；
- b) DDR 所在节点接收到共享写请求后，将接收到的数据写入 DDR，随后根据写入操作成功与否向 MPU 所在节点返回独立响应，如图 43 (b) 所示；
- c) 当 MPU 的数据在 DDR 中准备好后，DDR 所在节点作为请求者向 DSP 所在节点发起中断事务，DSP 所在节点响应者接口接收到中断请求后将其解包产生中断信息传递给 DSP，DSP 根据返回的信息对 DDR 进行读数据的操作，如图 43 (b) 所示；
- d) DSP 接收到中断信息后，作为请求者与 DDR 所在节点完成读事务，读取的数据为 MPU 向 DDR 中传送的数据，如图 43 (c) 所示。

8.6 主节点-对等节点数据传送过程

8.6.1 主节点到对等节点的数据传送过程

主节点有发起数据传送的能力，对等节点有接受数据传送请求并作出对应响应的能力，主节点到对等节点的传送过程与主节点-从节点传送过程无异，响应数据传送请求的对等节点身份为“虚从节点”（具体介绍详见 8.4 章节：主节点-从节点数据传送过程）。

8.6.2 对等节点到主节点的数据传送过程

主节点只有发起数据传送的能力而无对数据传送进行响应的能力，对等节点有发起数据传送的能力。对等节点到主节点的数据传送过程与主节点-主节点数据传送过程无异，发起数据传送的对等节点身份为“虚主节点”（具体介绍详见 8.5 章节：主节点-主节点数据传送过程）。

8.7 对等节点-对等节点数据传送过程

对等节点既有发起数据传送的能力，又有对数据传送做出响应的能力，对等节点到对等节点的数据传送过程与主节点-从节点的数据传送过程无异，发起数据传送的对等节点身份为“虚主节点”，响应数据传送请求的对等节点身份为“虚从节点”（具体介绍详见 8.4 章节：主节点-从节点数据传送过程）。

8.8 对等节点-从节点数据传送过程

对等节点有发起数据传送的能力，从节点有接受数据传送请求并做出对应响应的能力。对等节点到从节点的数据传送过程与主节点-从节点数据传送过程无异，发起数据传送的对等节点身份为“虚主节点”（具体介绍详见 8.4 章节：主节点-从节点数据传送过程）。

8.9 从节点-从节点数据传送过程

从节点无发起数据传送的能力，故从节点于从节点间的数据传送，应当存在发起数据传送的主节点或对等节点（虚主）。

多拓展互联芯粒间的传送相较于但拓展互联芯粒内的传送增加了扩展端口的传输以及数据包本地数据链路或旁路通路的判断，具体详见 8.3.3 章节，此处仅介绍单拓展互联芯粒内的传送。从节点-从节点数据传送由 DMA 事务完成，以主机节点 MPU 发起 DMA 事务，实现从节点 DDR0 到从节点 DDR1 的数据传送为例，其流程如图 44 所示。

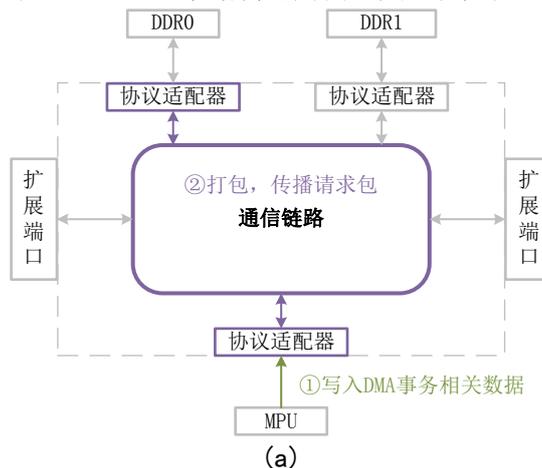


图 43 从节点-从节点数据传送过程（第 1 页/共 2 页）

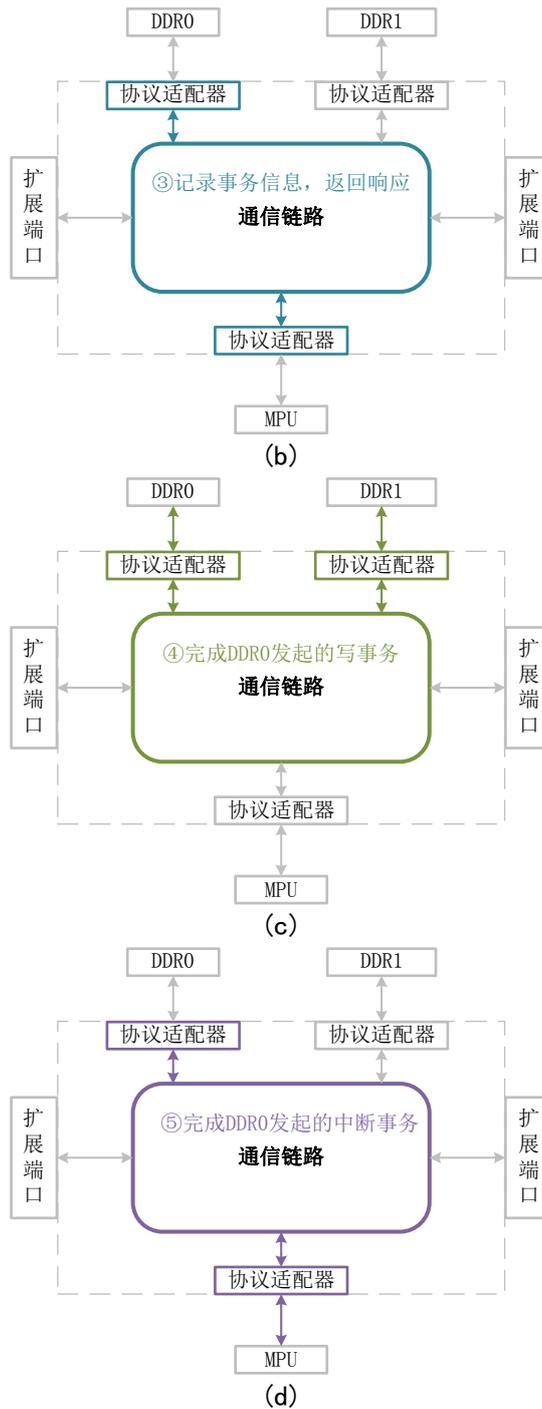


图 44 从节点-从节点数据传送过程 (第 2 页/共 2 页)

a) MPU配置请求者接口中DMA事务信息，如图 44 (a) 所示

b) MPU 所在节点请求者接收到事务信息后，将其打包为 DMA 请求包格式，并通过通信链路转发到 DDR0 所在节点处。DDR0 所在节点的响应者接口接收到 DMA 请求后，记录请求包含的 DDR1 的信息，并向 MPU 所在节点返回独立响应，如图 44 (b) 所示；

c) DDR0 所在节点的响应者接口根据记录的信息，向 DDR1 发起写请求。DDR1 接收到写请求后，其响应者接口将该请求解包，并将待写入的数据写入 DDR1 中,完成写入工作后，向 DDR0 返回独立响应，如图 44 (c) 所示；

d) DDR0 接收到 DDR1 返回的响应后，根据其正负性以及上述缓存的 MPU 的信息，作为请求者向 MPU 所在节点发起中断事务，如图 44 (d) 所示。

参考文献

- [1] Gen-Z core specification 1.1e[S/OL]. <https://www.computeexpresslink.org/projects-3>
- [2] Compute Express Link Specification [S/OL]. <https://www.computeexpresslink.org/>
- [3] Universal Chiplet Interconnect Express (UCIe) Specification [S/OL]. <https://www.uciexpress.org/specifications>